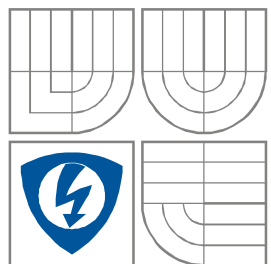


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

EFEKTOVÝ ZESILOVAČ A PROCESOR PRO DOMÁCÍ AUDIO POSLECH

SURROUND AMPLIFIER AND PROCESSOR FOR HOME AUDIO LISTENING

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT
BACHELOR'S PROJECT

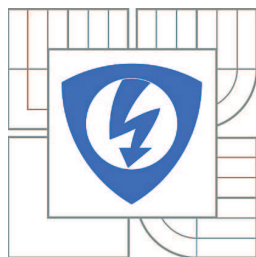
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Petr Šenfluk

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Petr Šenfluk

ID: 125655

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Efektový zesilovač a procesor pro domácí audio poslech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce navrhnete surround zesilovač s procesorem pro domácí poslech. Předpokládejte stereofonní vstup audio signálu, limiter pro oba kanály, řízení hlasitosti a audio filtry pro rozdělení signálu do efektových kanálů. Výstupní zesilovač by měl mít výstup 3 kanálů s výstupním výkonem do 15 W / 6 ohmů. Provedte návrh digitální zpožďovací linky pro efektové kanály. V praktické části práce vytvořte kompletní konstrukční podklady k realizaci návrhu (schéma zapojení, návrh desky plošného spoje, rozložení a soupiska součástek atd.). Navržené zařízení realizujte formou funkčního prototypu a experimentálním měření v laboratoři nízkofrekvenční elektroniky ověřte jeho činnost. Výsledky měření zpracujte formou standardního protokolu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WIRSUM, S. Abeceda nf techniky. Praha: BEN – technická literatura, 2003.

[2] Texas Instruments [online]. Datasheet TPA3122D – 15-W Stereo Class-D Audio Power Amplifier (Rev. A). Texas Instruments, Inc., 2007 - [cit. 4. 5. 2011]. Dostupné na [www: http://focus.ti.com/lit/ds/slos527a/slos527a.pdf](http://focus.ti.com/lit/ds/slos527a/slos527a.pdf)

[2] ŠTÁL, P. Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D - základní principy a konstrukce. Praha: BEN – technická literatura, 2008.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

ABSTRAKT

Tématem bakalářské práce je návrh efektového zesilovače a procesoru pro domácí audio poslech. Jedná se o tří-kanálový zesilovač třídy D doplněný o analogové a digitální vstupní obvody zpracovávající analogový stereo signál. Tyto vstupní obvody plní funkce předzesilovače, automatického řízení hlasitosti, analogových filtrů a digitální zpožďovací linky, které umožňují provoz v celkově třech volitelných režimech. Jednotlivými režimy jsou stereo reprodukce, stereo reprodukce doplněná o subbasový kanál a přídavná reprodukce vytvářející prostorový efekt.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výkonový audio zesilovač ve třídě D, prostorový zvuk, digitální zpožďovací linka, automatické řízení hlasitosti.

ABSTRACT

The aim of bachelor's thesis is design of an effect amplifier and processor for home audio listening. It includes three-channel class-D audio power amplifier supplemented with analog and digital input stages processing analog stereo signal. These input stages have a function of pre-amplifier, automatic volume control, analog filters and digital delay line, which make it usable generally in three elective modes. These elective modes are stereo reproduction, stereo reproduction supplemented with subbass channel and additional reproduction creating surround effect.

KEYWORDS

Class-D audio power amplifier, surround sound, digital delay line, automatic volume control.

ŠENFLUK, P. *Efektivní zesilovač a procesor pro domácí audio poslech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 1 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Efektivní zesilovač a procesor pro domácí audio poslech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Tomáši Kratochvílovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Návrh blokového schématu	2
2 Výkonová jednotka a napájení zařízení	3
2.1 Vstupní EMI filtr	3
2.2 Usměrnovač	3
2.3 Stabilizátor napětí	3
2.4 Výkonové zesilovače	4
2.5 Invertor pro můstkový zesilovač.....	5
2.6 Změřené parametry výkonové jednotky	6
3 Napájecí jednotka	9
3.1 První blok napájecí části	9
3.2 Druhý blok napájecí části	10
4 Vstupní jednotka	11
4.1 Audio limitory	11
4.2 Součtový a rozdílový zesilovač	12
4.3 Funkce relé.....	12
4.4 Změřené parametry vstupní jednotky	12
5 Efektivní jednotka	14
5.1 Výhybka pro pasivní subwoofer	14
5.2 Výhybka pro satelity	15
5.3 Efektivní kanál	16
5.4 Změřené parametry efektivní jednotky	17
6 Podpůrné obvody a doplňující informace	19
6.1 Zpožděné připojení reproduktorů	19
6.2 Přepínač režimů a jejich indikace	20

6.3	Detail zapojení konektorů scart	20
6.4	Možnosti připojení zařízení	21
7	Závěr	22
	Literatura	23
	Seznam příloh	24

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Zjednodušené blokové schéma.	2
Obr. 2.1:	Vstupní EMI filtr.....	3
Obr. 2.2:	Zapojení stabilizátoru napětí.....	4
Obr. 2.3:	Modulová frekvenční charakteristika výstupních filtrů zesilovače.	5
Obr. 2.4	Harmonické zkreslení a šum jednoho kanálu stereo zesilovače.	6
Obr. 2.5	Harmonické zkreslení můstkového zesilovače.	7
Obr. 3.1:	První blok napájecí části.	9
Obr. 3.2:	Druhý blok napájecí části.....	10
Obr. 4.1	Vstupně-výstupní charakteristika limiteru.	13
Obr. 4.2	Harmonické zkreslení a šum jednoho kanálu limiteru.....	13
Obr. 5.1:	Modulová frekvenční charakteristika výhybky pro pasivní subwoofer.....	15
Obr. 5.2:	Modulová frekvenční charakteristika výhybky pro satelity.....	16
Obr. 5.3:	Modulová frekvenční charakteristika filtru pro efektový kanál.	17
Obr. 5.4:	Modulová frekvenční charakteristika efektového kanálu.	18
Obr. 5.5:	Zkreslení a šumu efektového kanálu.....	18
Obr. 6.1:	Obvod zpožděného připojení reproduktorů.	19
Obr. 6.2:	Zapojení přepínače režimů a indikačních LED diod.	20
Obr. 6.3:	Detailní zapojení konektoru scart.	20

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Základní parametry obvodu TPA3122D.....	4
Tab. 2.2:	Základní vlastnosti operačního zesilovače OPA1641.....	6
Tab. 4.1:	Základní vlastnosti fotorezistoru Tesla.....	11
Tab. 5.1:	Závislost harmonického zkreslení a zpoždění na odporu P_1	16
Tab. 5.2:	Šumové vlastnosti jednotlivých částí efektové jednotky.....	17
Tab. 7.1:	Nejdůležitější parametry funkčního prototypu.....	22

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem audio zesilovače pro domácí poslech, dále jen zařízení, s využitím moderních elektronických součástek, které lze objednat jako zkušební vzorky firmy Texas Instruments. Jádrem zařízení jsou výkonové audio zesilovače pracující v třídě D, což má za následek snížení ztrátového výkonu a požadavku na výkon zdroje na minimum, a operační zesilovače určené převážně pro audio aplikace vysoké kvality, které se vyznačují velmi nízkým harmonickým a intermodulačním zkreslením a minimálním šumem.

Navrhované zařízení by mělo pracovat v několika volitelných režimech. První režim je standardní stereo zesilovač (2.0) a druhý režim je stereo zesilovač pro satelity doplněný o zesilovač pro pasivní subwoofer (2.1). Třetí režim je přídavný efektový zesilovač doplněný o zesilovač pro pasivní subwoofer (4.1). Tento poslední režim doplňuje stávající stereo sestavu (TV, HiFi ...) o efektové kanály vytvářející prostorový zvukový efekt.

Další funkcí zařízení je vstupní audio limiter, jehož úkolem je automaticky udržovat konstantní zvolenou úroveň hlasitosti pro libovolnou úroveň vstupního signálu pohybující se v daných mezích. Tyto meze by měly být dostatečné pro běžné úrovně výstupních signálů většiny zařízení.

Následující text je členěn do 7 základních kapitol. Kapitola 1 popisuje celkové blokové schéma zapojení a zobrazuje zjednodušené blokové schéma zpracování zvukového signálu. Kapitola 2 popisuje výkonovou jednotku včetně napájení celého zařízení. Kapitola 3 popisuje podpůrné napájecí obvody. Kapitoly 4 a 5 popisují vstupní a efektovou část. Podpůrné obvody a doplňující informace jsou popsány v kapitole 6. Závěrečné hodnocení práce je uvedeno v kapitole 7.

1 NÁVRH BLOKOVÉHO SCHÉMATU

V následujícím textu je uveden popis jednotlivých bloků celkového blokového zapojení uvedeného v příloze A.1. Dále je uvedeno zjednodušené blokové schéma zpracování zvukového signálu.

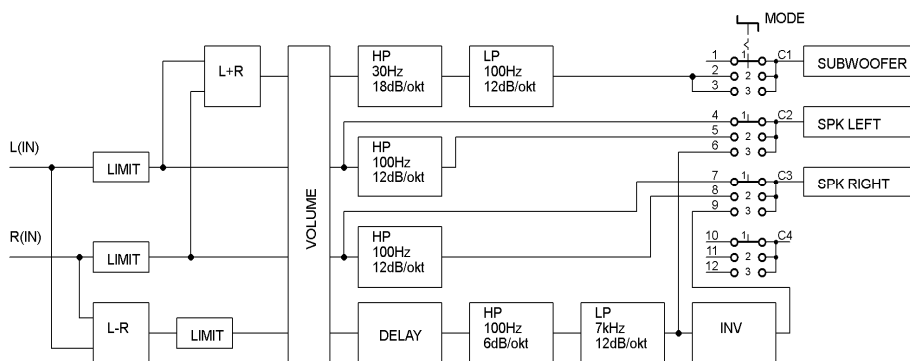
Síťové napájecí napětí nejprve přichází na vstupní EMI filtr, jehož hlavní funkce je potlačení vysokofrekvenčních rušivých složek z rozvodné sítě. Filtr zároveň obsahuje tavnou pojistku pro ochranu zařízení před zničením při poruše a slouží jako bod pro připojení hlavního síťového vypínače. Následuje transformátor s jednoduchým sekundárním vinutím, jehož parametry jsou výkon alespoň 40W a napětí 15-20V.

Výkonová část (POWER) obsahuje tří-kanálový zesilovač s výkonem 10W pro první dva kanály a 20W pro třetí kanál a usměrňovač střídavého napětí transformátoru, který dále napájí samotný zesilovač a napájecí jednotku (SOURCE). Napájecí jednotka slouží převážně k napájení vstupní a efektové části zařízení a k napájení dalších podpůrných obvodů.

Reproduktory stereo zesilovače jsou chráněny pomocí obvodu zpožděného připojení reproduktorů (RELE) napájeného rovněž z napájecí jednotky.

Vstupní stereo signál odebíraný z konektorů SCART_IN/LINE_IN, případně JAKC_IN, je zpracován vstupní jednotkou (INPUT), která obsahuje audio limiter pro oba kanály a rozdílový a součtový zesilovač pro vytvoření základů efektového kanálu a kanálu pro subwoofer. Výsledné 4 signály vstupují do efektové jednotky (EFFECTS), kde jsou pomocí analogových filtrů a digitální zpožďovací linky vytvořeny výsledné signály pro přední satelity, pasivní subwoofer a efektové reproduktory.

Mezi efektovou a výkonovou jednotku je zařazen přepínač, který umožňuje volbu jednoho ze tří režimů připojení příslušných signálů ke vstupu zesilovače. Zároveň tato část podle příslušného počtu rozsvícených LED diod indikuje aktuální režim.



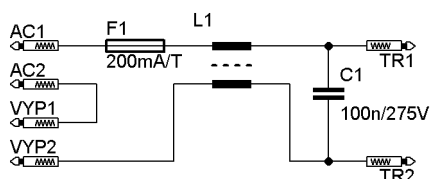
Obr. 1.1: Zjednodušené blokové schéma.

Obr. 1 zobrazuje zjednodušené blokové schéma zpracování zvukového signálu včetně parametrů jednotlivých filtrů. Blok DELAY je digitální zpožďovací linka a blok INV je invertující zesilovač pro fázový posuv signálu o 180°. Blok volume je 4-násobný potenciometr sloužící jako globální nastavení hlasitosti.

2 VÝKONOVÁ JEDNOTKA A NAPÁJENÍ ZAŘÍZENÍ

Celkové zapojení výkonové části je uvedeno v příloze A.2. V následujícím textu je také uvedeno zapojení vstupního EMI filtru a stabilizátoru napětí. Deska plošného spoje a osazovací plán výkonové jednotky jsou uvedeny v příloze B.1.

2.1 Vstupní EMI filtr



Obr. 2.1: Vstupní EMI filtr.

Funkcí filtru je potlačení vysokofrekvenčního rušení rozvodné sítě přivedené na piny AC1 a AC2. Na piny VYP1 a VYP2 je připojen hlavní síťový vypínač. Kondenzátor C_1 je volen z bezpečnostní třídy X2. Vstupní pojistka je pomalá, umožňuje dodat do primárního vinutí transformátoru (piny TR1 a TR2) trvalý výkon $P = 50W$ a špičkový výkon o něco větší. Prvek L_1 je standardní odrušovací tlumivka na společném jádře pro proud alespoň $I = 200mA$. Deska plošného spoje a osazovací plán vstupního EMI filtru jsou uvedeny v příloze B.5.

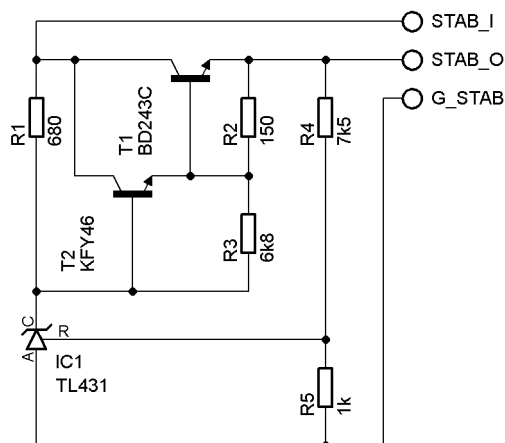
2.2 Usměrňovač

Jde o standardní dvoucestný usměrňovač doplněný o filtrační kondenzátory C_{D1} až C_{D4} . Usměrněný signál je filtrován elektrolytickým kondenzátorem typu low-ESR s kapacitou $C = 4,7\text{ mF}$ pro napětí $U = 50\text{ V}$. Navíc je výstup doplněn o zenerovu diodu pro napětí $U_Z = 30\text{ V}$, která v případě přepětí na vstupu vyřadí pojistku F_2 a ochrání tak připojený výkonový zesilovač.

Záporný pól filtračního kondenzátoru slouží jako centrální zemnicí bod pro spojení všech analogových a digitálních zemí nejen obvodů výkonové části, ale i celého zařízení. Díky tomu je sníženo rušení vlivem zemních smyček na minimum.

2.3 Stabilizátor napětí

Výkonová jednotka byla doplněna o stabilizátor na samostatné desce plošného spoje. Ten slouží k stabilizaci napájecího napětí pro napájení celého zařízení (včetně výkonových zesilovačů a napájecí jednotky). Tímto je dosaženo snížení rušivých napětí na výstupu výkonového zesilovače a zároveň jsou minimalizovány vlivy případných parazitních zemních smyček. Schéma zapojení stabilizátoru je na Obr 2.2.



Obr. 2.2: Zapojení stabilizátoru napětí.

Jde o zpětnovazební stabilizátor s integrovaným obvodem TL431, který slouží jako napěťová reference o hodnotě $U_{ref} = 2,5 \text{ V}$. Výstupní napětí je dáno vztahem (2.1). Deska plošného spoje a osazovací plán stabilizátoru jsou uvedeny v příloze B.6.

$$U_{out} = \frac{U_{ref}}{R_5} \cdot (R_5 + R_4) = 21,25 \text{ V} \quad (2.1)$$

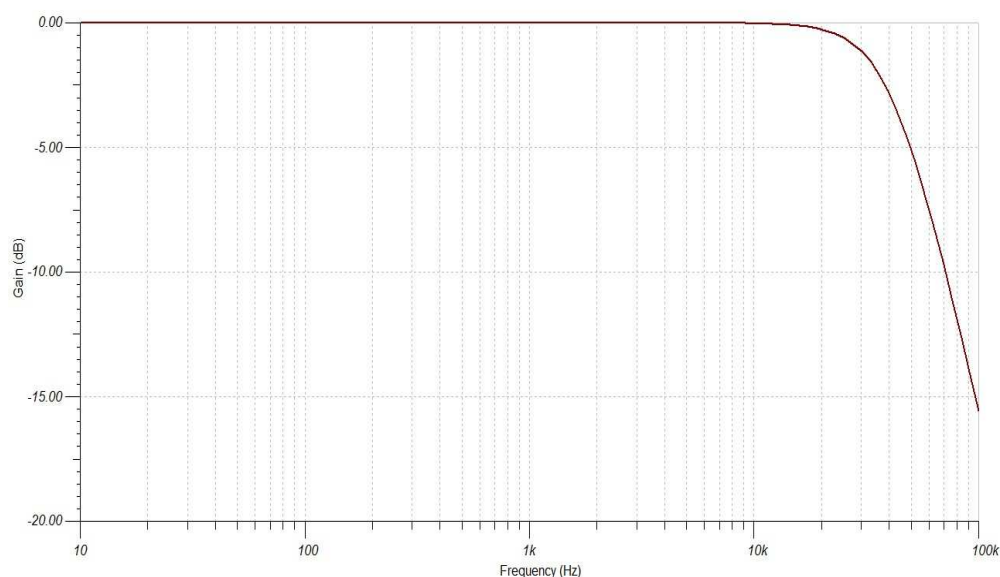
2.4 Výkonové zesilovače

Jako výkonové zesilovače jsou použity 2 stereo zesilovače pracující v třídě D firmy Texas Instruments TPA3122D. Pro první zesilovač je použito můstkové zapojení, druhý zesilovač využívá stereo zapojení, dohromady tedy celkem tři kanály. Zesilovače jsou zapojeny podle doporučeného katalogového zapojení [1]. Základní parametry tohoto obvodu jsou uvedeny v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Základní parametry obvodu TPA3122D.

V_{cc}	(10 – 30) V
P_O	10 W / kanál pro $R_L = 4 \Omega$ 15 W / kanál pro $R_L = 8 \Omega$
$THD+N$	0,1% pro $R_L = 4 \Omega$, $P_O = 1 \text{ W}$, $f = 1 \text{ kHz}$ 0,06% pro $R_L = 8 \Omega$, $P_O = 1 \text{ W}$, $f = 1 \text{ kHz}$
SNR	99 dB pro $THD+N < 1 \%$
f_{osc}	250 kHz

Jedná se o audio výkonový zesilovač v třídě D, jehož zapojení obsahuje výstupní LC filtry typu dolní propust 2. řádu pro potlačení spínací frekvence. Hodnoty součástek filtrů byly zvoleny pro zátěž stereo zesilovače 4Ω a pro zátěž můstkového zesilovače 8Ω . Simulace modulové frekvenční charakteristika těchto filtrů je vidět na Obr 2.2.



Obr. 2.3: Modulová frekvenční charakteristika výstupních filtrů zesilovače.

Zesílení zesilovačů je nastaveno na 20 dB, tj. $A_u = 10$. Vstupní citlivost stereo zesilovače pro výstupní výkon $P_O = 10$ W při impedanci reproduktorů $R_L = 4 \Omega$ je podle vztahu (2.2) $U_{IN} = 630$ mV, vstupní citlivost můstkového zesilovače pro výstupní výkon $P_O = 20$ W a impedanci reproduktoru $R_L = 8 \Omega$ je dle vztahu (2.3) rovněž $U_{IN} = 630$ mV, zesílení celkového můstkového zesilovače je ve skutečnost 20, je to dáno vstupním invertorem.

$$U_{INS} = \frac{1}{A_u} \sqrt{P_S R} \quad (2.2)$$

$$U_{INB} = \frac{1}{2A_u} \sqrt{P_B R} \quad (2.3)$$

Napájecí filtrační kondenzátory C_{Fx} jsou keramické a elektrolytické typu low-ESR. Vazební kondenzátory C_{INx} jsou tantalové, oproti fóliovým kondenzátorům mají vyšší kapacitu a nevykazují zkreslení způsobené piezoelektrickým jevem jako kondenzátory keramické [6].

2.5 Invertor pro můstkový zesilovač

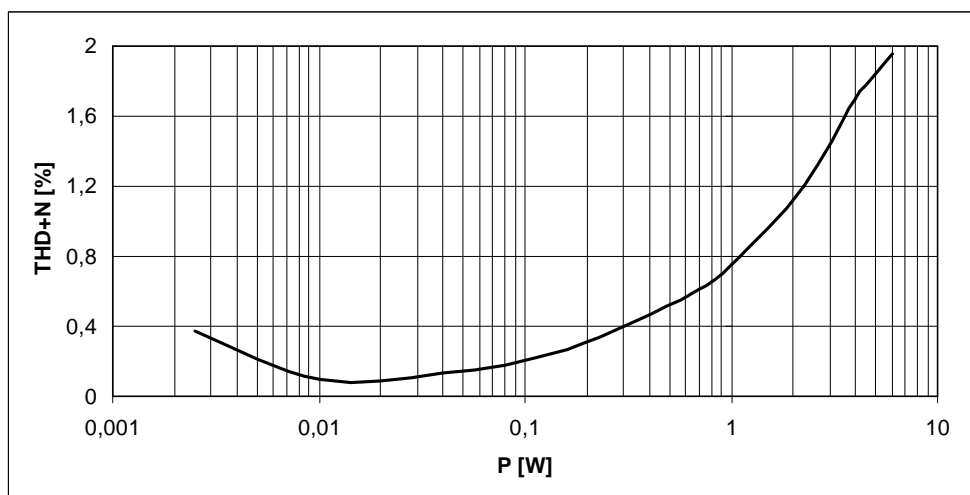
Zesilovač TPA3122D je stereo zesilovač, pro funkci zesilovače v můstkovém zapojení je proto třeba invertovat jeden vstupní kanál. Pro funkci invertoru byl zvolen operační zesilovač firmy Texas Instruments OPA1641, který je napájen z napájecí jednotky. Ta poskytuje napájecí napětí 15 V a umělou zem o napětí 7,5 V. Jedná se o operační zesilovač typu rail-to-rail, který umožňuje dosažení výstupního napětí blízkého napájecímu napětí. Základní vlastnosti operačního zesilovače jsou uvedeny v Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Základní vlastnosti operačního zesilovače OPA1641.

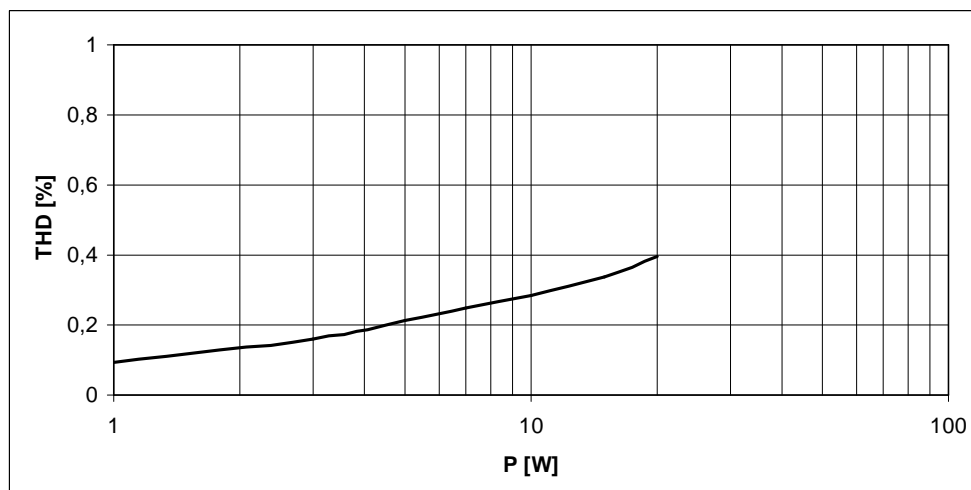
Napájecí napětí	$\pm(2,25 - 18) \text{ V}$
Napájecí proud	1,8 mA
Harmonické zkreslení	0,00005 % / 1 kHz
Intermodulační zkreslení	0,00008 %
Výkonová šířka pásma	3,2 MHz
Rychlost přeběhu	20 V / μs

2.6 Změřené parametry výkonové jednotky

Byly změřeny základní parametry výkonových zesilovačů, tj. harmonické zkreslení a šum v závislosti na výstupní výkonu, odstup signálu od šumu a činitel tlumení. Na obr. 2.4 je závislost harmonického zkreslení a šumu stereo zesilovače na výstupním výkonu pro $f = 1 \text{ kHz}$ a na obr. 2.5 závislost harmonického zkreslení můstkového zesilovače na výstupním výkonu pro $f = 100 \text{ Hz}$.



Obr. 2.4 Harmonické zkreslení a šum jednoho kanálu stereo zesilovače.



Obr. 2.5 Harmonické zkreslení můstkového zesilovače.

Činitel tlumení stereo zesilovače byl měřen pomocí odporové zátěže o hodnotě $R_Z = 4,7 \Omega$. Výstupní odpor zesilovače je dán vztahem (2.4).

$$R_{výst} = R_Z \frac{U_{20} - U_2}{U_2} = 0,37 \Omega, \quad (2.4)$$

kde $U_{20} = 5,32 \text{ V}$ je výstupní napětí zesilovače na prázdko a $U_2 = 4,93 \text{ V}$ je výstupní napětí po zatížení. Činitel tlumení je dán vztahem (2.5).

$$D_S = \frac{R_Z}{R_{výst}} = 12,64 \quad (2.5)$$

Činitel tlumení můstkového zesilovače byl měřen pomocí odporové zátěže o hodnotě $R_Z = 9,4 \Omega$. Výstupní napětí jsou $U_{20} = 12,6 \text{ V}$ a $U_2 = 12,2 \text{ V}$. Hodnota činitele tlumení je $D_M = 30,5$.

Činitel tlumení u můstkového zesilovače je lepší než u stereo zesilovače, i když samotný zesilovač (integrováný obvod) má v můstkovém zapojení dvojnásobný vnitřní odpor. To je dáno parazitní impedancí kondenzátoru na výstupu každého kanálu stereo zesilovače.

Odstup signálu od šumu byl měřen jako poměr maximálního výstupního napětí zesilovače ku šumovému výstupnímu napětí při zkratovaných vstupních svorkách. Odstup signálu od šumu stereo zesilovače je

$$S/N = 20 \log \left(\frac{U_{20}}{U_n} \right) = 90 \text{ dB}, \quad (2.6)$$

kde $U_n = 170 \mu\text{V}$ je šumové napětí na výstupu stereo zesilovače. Odstup signálu od šumu můstkového zesilovače je

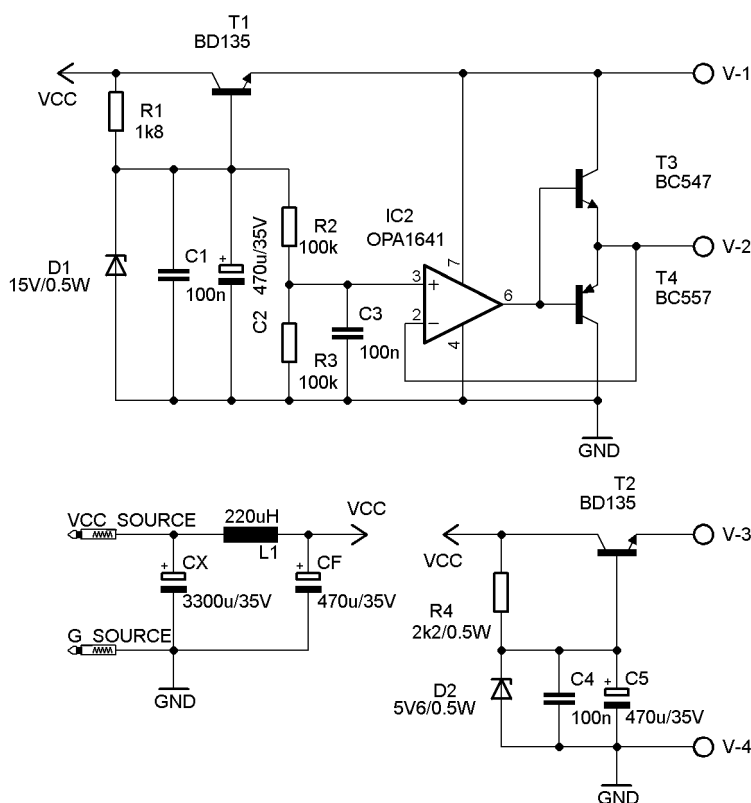
$$S / N = 20 \log \left(\frac{U_{20}}{U_n} \right) = 99 \text{ dB},$$

kde $U_n = 130 \text{ } \mu\text{V}$ je šumové napětí na výstupu můstkového zesilovače.

3 NAPÁJECÍ JEDNOTKA

Napájecí jednotka je rozdělená do dvou bloků. První blok je zdroj napětí pro operační zesilovače a digitální zpožďovací jednotku, tedy pro obvody zpracovávající analogový signál, kde je vysoký nárok na potlačení rušivých napětí. Druhý blok slouží pro napájení a automatické spínání relé použitých ve vstupní jednotce, v obvodu pro opožděné připojení reproduktoru a pro napájení LED diod signalizujících aktuální zvolený režim. Deska plošného spoje a osazovací plán napájecí jednotky jsou uvedeny v příloze B.4.

3.1 První blok napájecí části



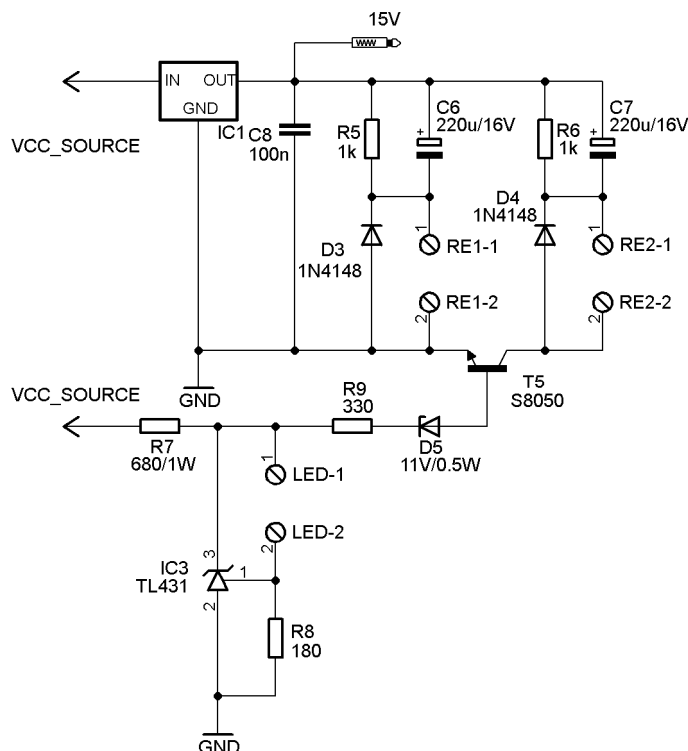
Obr. 3.1: První blok napájecí části.

Schéma zapojení prvního bloku napájecí části je uvedeno na obr. 3.1. Pro maximální potlačení rušivých kmitočtů je použit LC filtr. Dále je zapojení navrženo jako paralelní stabilizátor napětí $U = 15\text{V}$ (R_1 , D_1) a $U = 5,6\text{V}$ (R_4 , D_2) doplněný o emitorový sledovač tranzistorů T_1 a T_2 . Na emitoru tranzistoru T_2 je výsledné napětí 5V pro napájení digitální zpožďovací linky. Na emitoru tranzistoru T_1 je pak napětí 14,4V pro napájení operačních zesilovačů doplněné o umělou zem s napětím $U = 7,5\text{V}$ (IC_2 , T_3 , T_4).

Uvedené zapojení nemá stabilizaci výstupního napětí zpětnou vazbou a proto vykazuje teplotní drift, který způsobí drobné kolísání napětí na výstupu, toto kolísání

napětí ovšem na funkci operačních zesilovačů a digitální zpožďovací linky nemá vliv. Toto zapojení bylo vybráno z důvodu lepšího potlačení rušivých napětí než klasické sériové zpětnovazební regulátory.

3.2 Druhý blok napájecí části



Obr. 3.2: Druhý blok napájecí části.

Integrovaný stabilizátor 78L15 slouží jako zdroj napětí $U = 15\text{V}$ pro relé. Relé 1 (RE1-1 a RE1-2) se sepne ihned po zapnutí zařízení a zůstane zapnuté až do vypnutí zařízení. Relé 2 (RE2-1 a RE2-2) je spínáno jednoduchým komparátorem tvořeným tranzistorem T_5 a diodou D_5 , potřebná úroveň pro sepnutí tohoto komparátoru je 11,6V. Paralelní regulátor TL431 slouží jako proudový zdroj pro napájení signalizačních LED diod (LED-1 a LED-2). Proud je nastaven rezistorem R_8 na hodnotu $I = 14\text{mA}$. LED diody se připojují sériově, počet připojených LED diod je 2, 3 nebo 5 v závislosti na zvoleném režimu. V případě připojení 5ti LED diod je na výstupu LED-1 dostatečné napětí pro sepnutí komparátoru a dojde k sepnutí relé 2.

Funkce jednotlivých relé je objasněna v kapitole 4. Relé jsou provozovány v ekonomickém režimu využívající napěťovou hysterezi přitahu a odtahu kotvy relé. Kondenzátory C_6 a C_7 zaručí dostatečně vysoké napětí během sepnutí relé pro přitah kotvy, dále je nastaven klidový proud rezistory R_5 a R_6 pro udržení sepnuté kotvy během dalšího provozu. Cívky relé jsou na napětí $U = 12\text{V}$ o impedanci $R = 1000\ \Omega$.

4 VSTUPNÍ JEDNOTKA

Kompletní zapojení vstupní části je uvedeno v příloze A.3. Vstupní část obsahuje audio limiter pro levý a pravý kanál (I_{C1A} , I_{C1B}), součtový zesilovač (I_{C2}) pro basový kanál a rozdílový zesilovač a třetí audio limiter pro vytvoření efektového kanálu (I_{C1C} , I_{C1D}). Výsledkem jsou 4 kanály vyvedené z 4-násobného potenciometru sloužícího jako globální nastavení hlasitosti. Výstupní úrovně levého, pravého a efektového kanálu vstupní části odpovídají vstupní citlivosti výkonového stereo zesilovače. Výstupní úroveň kanálu pro subwoofer může být vyšší, více v kapitole 5. Deska plošného spoje a osazovací plán vstupní jednotky jsou uvedeny v příloze B.2.

4.1 Audio limity

Limiter pracuje jako invertující zesilovač, PR_X je fotorezistor K0760 10 firmy Tesla (někdy prodáváný pod názvem LDR 07-10) pro řízení zesílení osvětlován LED diodou D_X . Základní parametry jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1: Základní vlastnosti fotorezistoru Tesla.

λ_{smax}	600 nm
R_{10lx}	6,5 ... 13,5 k Ω
R_{max}	1 M Ω

Fotorezistor má maximální dynamický rozsah přibližně 40dB. Výstupní napětí je dáno tranzistorem T_X a nastaveno rezistory R_{18} a R_{19} v případě levého kanálu na hodnotu přibližně 707mV. Výstupním napětím a zesílením

$$U_{IN} = U_{OUT} \left(- \frac{R_1}{PR_1 \parallel R_{20}} \right) \quad (4.1)$$

je dán maximální rozsah napětí vstupního signálu na 60 mV – 3,43 V. Rezistor R_{20} (R_{21} , R_{22}) slouží k omezení maximálního zesílení z důvodu zlepšení šumových parametrů. Použitelný rozsah napětí vstupního signálu je menší přibližně o 15 dB, čemuž odpovídají hodnoty vstupního signálu 200 mV – 2 V. Důvodem je velká závislost minimálního odporu na předešlém osvětlení a velká reakční doba v oblasti maximálního odporu fotorezistoru. Rozsah zpracování napětí vstupních signálů je tedy 20dB.

Jako LED dioda může být použita libovolná svítivá dioda s vhodnou vlnovou délkou dle tab. 4.1.

Limity pro levý a pravý kanál jsou totožné, třetí limiter pro efektový kanál má větší zesílení (dáno rezistorem R_9), rozsah napětí vstupního signálu je tedy 110mV – 1,1V.

4.2 Součtový a rozdílový zesilovač

Součtový zesilovač (IC₂) slouží k vytvoření základu kanálu pro pasivní subwoofer, zesílení je dáno vztahem:

$$U_{OUT} = -\frac{R_{13}}{R_{11}} \cdot (U_{IN1} + U_{IN2}). \quad (4.2)$$

Rozdílový zesilovač má jednotkové zesílení a vytváří základ efektového kanál rozdílem levého a pravého vstupního kanálu. Podrobnější vysvětlení v kapitole 5.

4.3 Funkce relé

Relé 1 a 2 slouží k vhodnému připojení linkového výstupu (konektory SCART_OUT a cinch) k zařízení. V případě vypnutí zařízení se linkový výstup připojí přímo k vstupním konektorům (SCART_IN, cinch a jack). Zařízení je tak průchozí a neovlivňuje procházející audio signál.

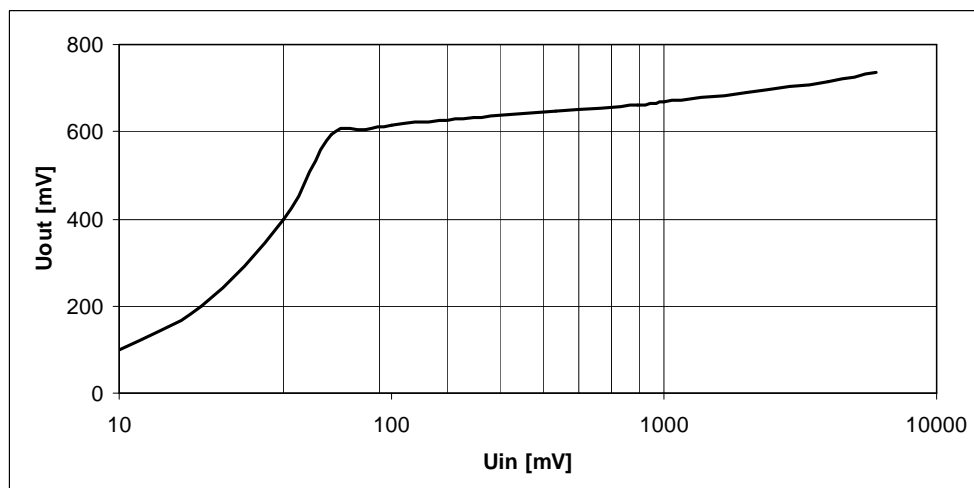
Při zapnutí v režimech 2.0 a 2.1 relé 1 přepne linkový výstup k výstupu limiterů pro levý a pravý kanál. Zařízení tak zajišťuje konstantní úroveň linkového výstupu a umožňuje nezávislou regulaci hlasitosti samotného zařízení a zařízení připojeného k linkovému výstupu.

V režimu 4.1 relé 2 přepojí linkový výstup k výstupu limiterů pro levý a pravý kanál za 4-násobný potenciometr. Globálním nastavením hlasitosti se tak nastavuje hlasitost samotného zařízení a zařízení připojeného k linkovému výstupu současně.

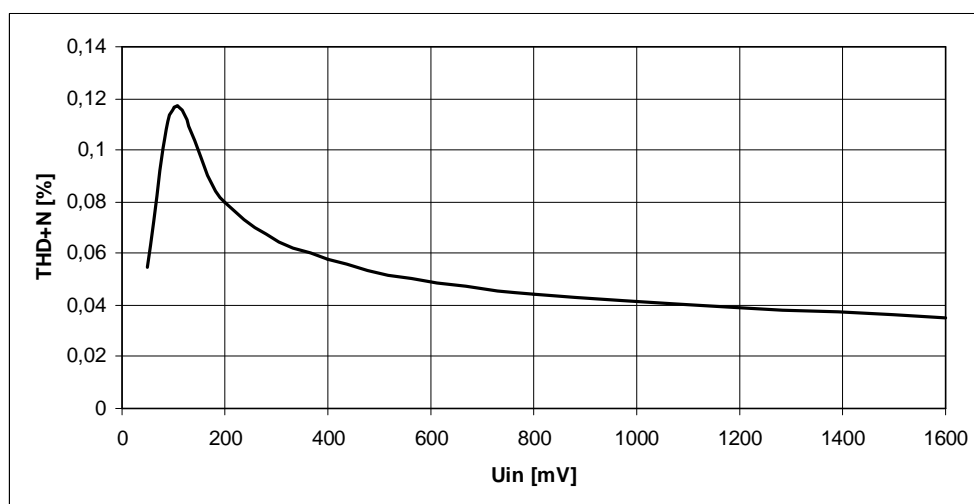
4.4 Změřené parametry vstupní jednotky

Byly změřeny vstupně-výstupní charakteristika limiteru, zkreslení a šum v závislosti na úrovni vstupního signálu, odstup signálu od šumu a přeslech mezi jednotlivými kanály. Na obr 4.1 je vstupně-výstupní charakteristika levého kanálu limiteru pro frekvenci vstupního signálu $f = 1$ kHz. Rozdíl výstupních napětí limiterů je pro rozsah vstupních napětí 200 mV – 2 V menší než 35 mV.

Na obr 4.2 je závislost harmonického zkreslení a šumu levého kanálu limiteru pro frekvenci vstupního signálu $f = 1$ kHz. Parametry levého a pravého kanálu se liší jen minimálně.



Obr. 4.1 Vstupně-výstupní charakteristika limiteru.



Obr. 4.2 Harmonické zkreslení a šum jednoho kanálu limiteru.

Odstup signálu od šumu byl měřen jako poměr maximálního výstupního napětí limiteru ku šumovému výstupnímu napětí při zkratovaných vstupních svorkách. Odstup signálu od šumu limiteru je

$$S / N = 20 \log \left(\frac{U_{20}}{U_n} \right) = 80 \text{ dB}, \quad (4.3)$$

kde $U_n = 60 \mu\text{V}$ je šumové napětí na výstupu limiteru a $U_{20} = 600 \text{ mV}$ je nejnižší výstupní napětí limiteru, při kterém již limiter pracuje jako omezovač.

Přeslech mezi jednotlivými kanály byl spočten dle vztahu (4.3), kde $U_n = 10 \text{ mV}$ je výstupní napětí limiteru na kanálu, jehož vstupní svorky byly vyzkratovány. Přeslech mezi jednotlivými kanály je maximálně -35dB.

5 EFEKTOVÁ JEDNOTKA

Kompletní zapojení efektové části je uvedeno v příloze A.4. Deska plošného spoje a osazovací plán efektové jednotky jsou uvedeny v příloze B.3.

5.1 Výhybka pro pasivní subwoofer

Výhybku pro pasivní subwoofer tvoří horní propust třetího řádu (IC_{1A}) s mezní frekvencí $f_0 = 30$ Hz, dolní propust druhého řádu (IC_{1D}) s mezní frekvencí $f_0 = 100$ Hz a potenciometr pro nastavení úrovně pasivního subwooferu. Úroveň signálu pro pasivní subwoofer vycházejícího ze vstupní jednotky není omezován limitem, výstupní úroveň závisí převážně na fázovém rozdílu levého a pravého kanálu. Při nastavení tohoto potenciometru na maximum může dojít k přebuzení zesilovače. V běžném provozu se však tento potenciometr nastaví tak, aby subjektivní hlasitost pasivního subwooferu odpovídala hlasitosti levého a pravého kanálu zesilovače, a k přebuzení tedy nedojde.

Pro zvolenou hodnotu kondenzátorů $C_1 = C_2 = C_3 = 100$ nF horní propusti jsou hodnoty rezistorů R_2 , R_3 a R_4 vypočteny dle následujících vztahů pro Butterworthovy filtry:

$$R_2 = \frac{0,5479}{2\pi f_0 C_1} = 29,066 \text{ k}\Omega \quad (5.1)$$

$$R_3 = \frac{0,1503}{2\pi f_0 C_1} = 7,973 \text{ k}\Omega \quad (5.2)$$

$$R_4 = \frac{7,435}{2\pi f_0 C_1} = 394,439 \text{ k}\Omega \quad (5.3)$$

Jako hodnoty rezistorů byly vybrány nejbližší hodnoty z řady E12, tedy $R_2 = 27 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 8,2 \text{ k}\Omega$ a $R_4 = 390 \text{ k}\Omega$.

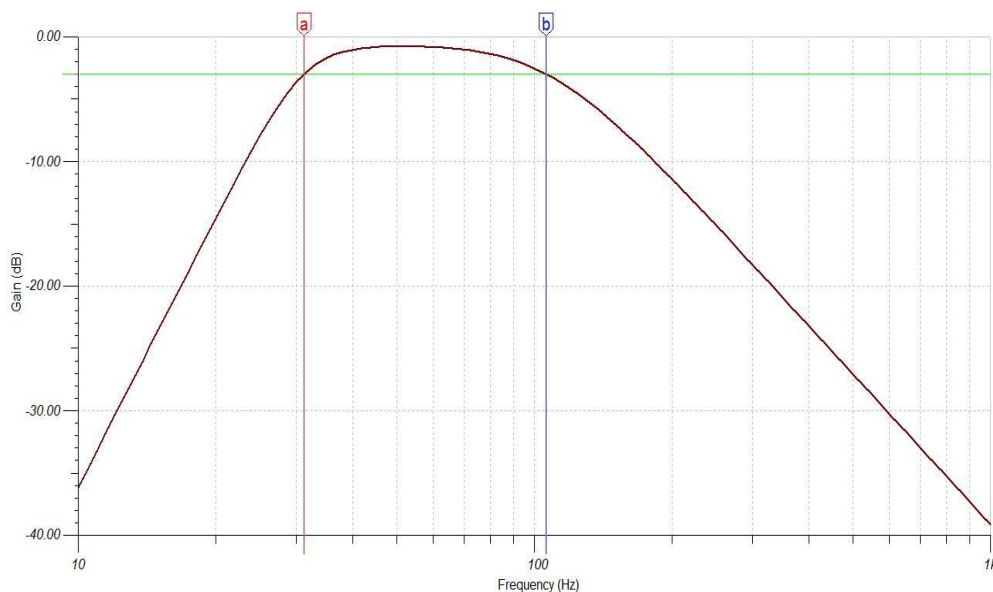
Pro zvolenou hodnotu rezistorů $R_{11} = R_{12} = 15 \text{ k}\Omega$ dolní propusti jsou hodnoty kondenzátorů C_8 a C_9 vypočteny dle následujících vztahů pro Butterworthovy filtry:

$$C_8 = \frac{1,638}{2\pi f_0 R_{11}} = 174 \text{ nF} \quad (5.4)$$

$$C_9 = \frac{0,6955}{2\pi f_0 R_{11}} = 74 \text{ nF} \quad (5.5)$$

Jako hodnoty kondenzátorů byly vybrány opět nejbližší hodnoty z řady, tedy

$C_8 = 150 \text{ nF}$ a $C_9 = 68 \text{ nF}$. Na Obr. 5.1 je zobrazena simulace modulové frekvenční charakteristiky tohoto filtru.



Obr. 5.1: Modulová frekvenční charakteristika výhybky pro pasivní subwoofer.

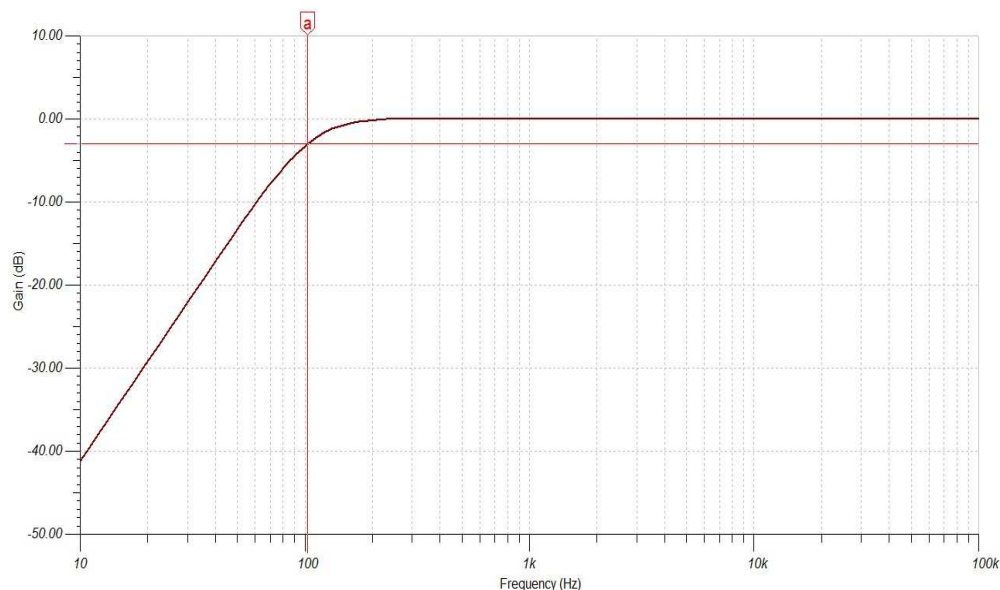
5.2 Výhybka pro satelity

Výhybku pro satelity tvoří dvě identické horní propusti druhého řádu (IC_{1B} a IC_{1C}) s mezní frekvencí $f_0 = 100 \text{ Hz}$. Pro zvolenou hodnotu kondenzátorů $C_4 = C_5 = 100 \text{ nF}$ propustí pro levý kanál jsou hodnoty rezistorů R_6 a R_7 vypočteny dle následujících vztahů pro Butterworthovy filtry:

$$R_6 = \frac{0,6105}{2\pi f_0 C_4} = 9,716 \text{ k}\Omega \quad (5.6)$$

$$R_7 = \frac{1,438}{2\pi f_0 C_4} = 22,886 \text{ k}\Omega \quad (5.7)$$

Jako hodnoty rezistorů byly vybrány nejbližší hodnoty z řady E12, tedy $R_6 = 10 \text{ k}\Omega$ a $R_7 = 22 \text{ k}\Omega$. Simulace modulové frekvenční charakteristiky horní propusti je na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Modulová frekvenční charakteristika výhybky pro satelity.

5.3 Efektivní kanál

Efektivní kanál využívá teorie Davida Haflera [4]. Jedná se o kvadrofonní audio systém, kde přední dva reproduktory jsou standardní stereo reproduktory (levý a pravý) a zadní levý i pravý reproduktor přehrávají rozdílovou složku levého a pravého předního kanálu. Zadní reproduktory tedy zpracovávají identický signál, jen u jednoho reproduktoru (pravého) je fáze posunuta o 180° (přehozena polarita reproduktoru). Tento základní princip využívá i technologie dolby surround. Tato technologie je dále doplněna o pásmovou propust s mezními frekvencemi $f_d = 100$ Hz a $f_h = 7$ kHz a digitální zpožďovací linku s nastavitelným zpožděním (30 – 90) ms. Zařízení je tedy možné připojit k standardnímu stereo signálu (Haflerův princip) nebo k stereo signálu z enkodéru dolby surround. Enkodér dolby surround využívá tzv. MP (motion picture) matici, která kóduje čtyři kanály (levý, centrální, pravý a surroundový) do dvou stereo kanálů.

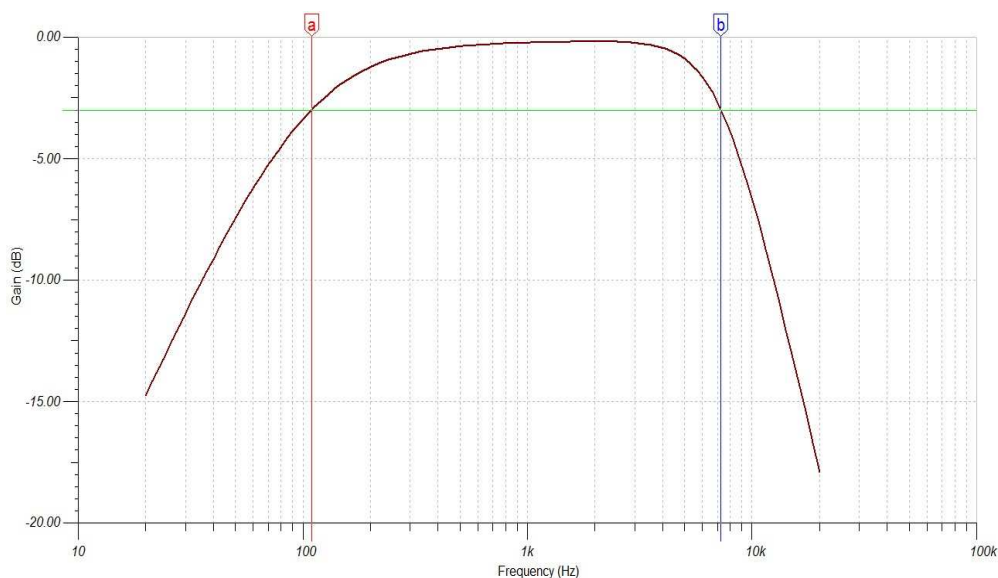
Základ efektivního kanálu přicházející ze vstupní jednotky je nejprve přiveden na digitální zpožďovací linku tvořenou základním katalogovým zapojením obvodu PT2399. Odporovým trimrem P_1 je možné nastavit zpoždění efektivního kanálu podle subjektivního vjemu (podle uspořádání reproduktorů v místnosti) v rozsahu (30 – 90) ms. Závislost harmonického zkreslení a zpoždění na odporu P_1 zobrazuje Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Závislost harmonického zkreslení a zpoždění na odporu P_1 .

P_1	4,9 k Ω	4,5 k Ω	4 k Ω	3,4 k Ω	2,8 k Ω	2,4 k Ω
t_d	86,3 ms	81 ms	75,9 ms	68,1 ms	61,6 ms	56,6 ms
THD	0,23 %	0,22 %	0,21 %	0,19 %	0,18 %	0,16 %
P_1	2 k Ω	1,67 k Ω	1,47 k Ω	1,28 k Ω	1,08 k Ω	894 Ω
t_d	52,3 ms	48,1 ms	45,8 ms	43 ms	40,6 ms	38,5 ms
THD	0,15 %	0,15 %	0,15 %	0,15 %	0,14 %	0,14 %

P₁	723 Ω	519 Ω	288 Ω	0,5 Ω
t_d	36,6 ms	34,4 ms	32,6 ms	31,3 ms
THD	0,14 %	0,13 %	0,13 %	0,13 %

Zapojení s operačním zesilovačem IC_{3A} je dolní propust druhého řádu s mezní frekvencí $f_h = 7$ kHz. Kondenzátor C₁₉ spolu s vnitřní impedancí dolní propusti tvoří horní propust prvního řádu s mezní frekvencí $f_d = 100$ Hz. Dále následuje potenciometr pro nezávislé nastavení hlasitosti efektových reproduktorů. Operační zesilovač IC_{3B} je invertor pro pravý efektový kanál. Simulace modulové frekvenční charakteristiky tohoto filtru je na Obr. 5.2.



Obr. 5.3: Modulová frekvenční charakteristika filtru pro efektový kanál.

5.4 Změřené parametry efektové jednotky

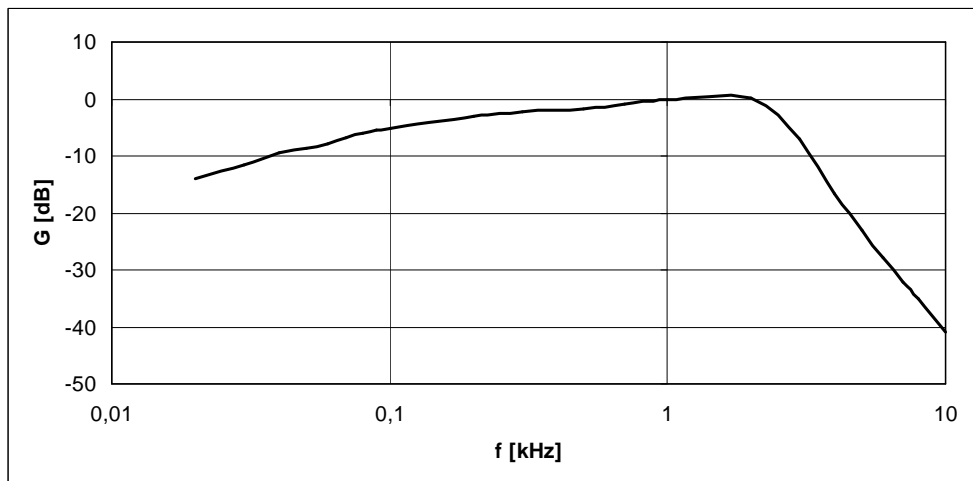
Byly změřeny šumové vlastnosti efektového kanálu, výhybky pro subwoofer a výhybky pro satelity. Dále byly změřeny modulová frekvenční charakteristika efektového kanálu a závislost harmonického zkreslení a šumu efektového kanálu na nastaveném zpoždění digitální zpožďovací linky.

Odstup signálu ku šumu jednotlivých částí efektové jednotky byl počítán podle vztahu (4.3). Šumové vlastnosti jednotlivých částí efektové jednotky jsou zobrazeny v tab. 5.2.

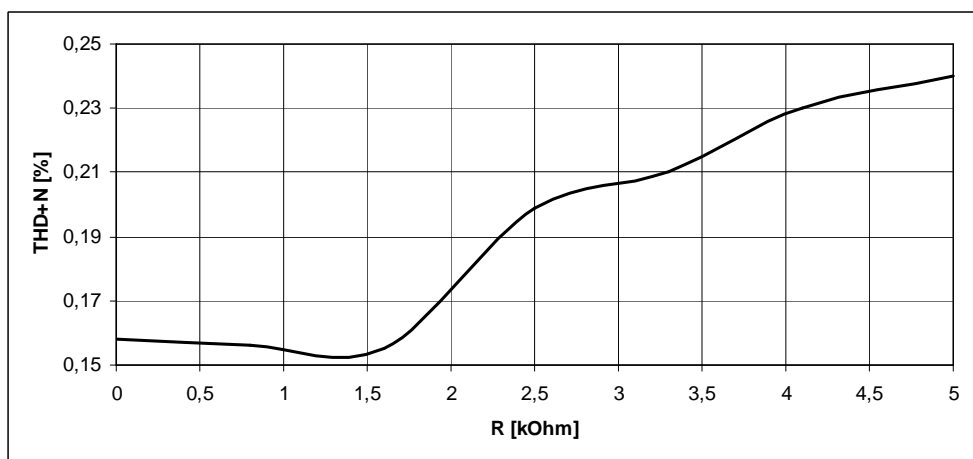
Tab. 5.2: Šumové vlastnosti jednotlivých částí efektové jednotky.

	Výstupní šum. napětí [μV]	Odstup signálu ku šumu [dB]
Výhybka pro subwoofer	10	95
Výhybka pro satelity	10	95
Efektový kanál	20	89

Na obr. 5.4 je modulová frekvenční charakteristika efektového kanálu včetně obvodu digitální zpožďovací linky PT2399, která způsobila změnu přenosové funkce efektového kanálu v oblasti vyšších kmitočtů oproti předpokladu z obr. 5.3.



Obr. 5.4: Modulová frekvenční charakteristika efektového kanálu.



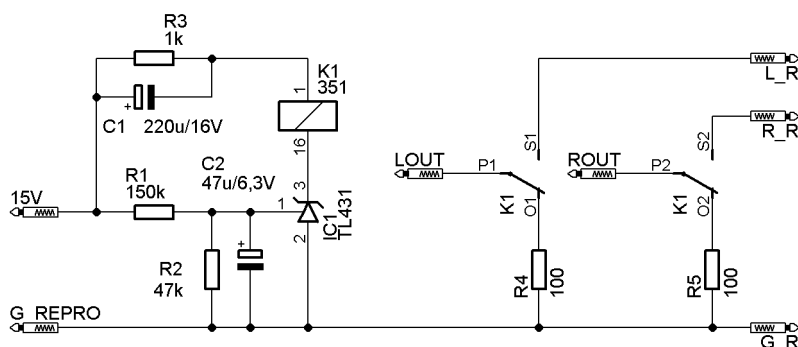
Obr. 5.5: Zkreslení a šumu efektového kanálu.

Na obr. 5.5 je zobrazena závislost harmonického zkreslení a šumu efektového kanálu na nastaveném zpoždění digitální zpožďovací linky. Hodnotám odporu potenciometru P_1 z grafu odpovídá rozsah zpoždění digitální zpožďovací linky (30 – 90) ms.

Změřený odstup rušivých napětí obvodu PT2399 odpovídá katalogovým údajům výrobce. Rovněž závislost harmonického zkreslení a šumu tohoto obvodu na nastaveném zpoždění odpovídá předpokladům dle tab. 5.1.

6 PODPŮRNÉ OBVODY A DOPLŇUJÍCÍ INFORMACE

6.1 Zpožděné připojení reproduktorů



Obr. 6.1: Obvod zpožděného připojení reproduktorů.

Stereo zesilovač není napájen symetricky a proto má na výstupu vazební kondenzátory. Tyto kondenzátory se při zapnutí zesilovače nabíjí na polovinu napájecího napětí. Tento nabíjecí proud teče přes připojený reproduktor a vytvoří napěťovou špičku, která může připojený reproduktor poškodit a navíc působí rušivě. Tento obvod zajistí opožděné připojení reproduktorů a během doby, kdy reproduktory nejsou připojeny, nabije výstupní vazební kondenzátory přes rezistory R_4 a R_5 . Čas zpoždění je dán dle následujícího vzorce:

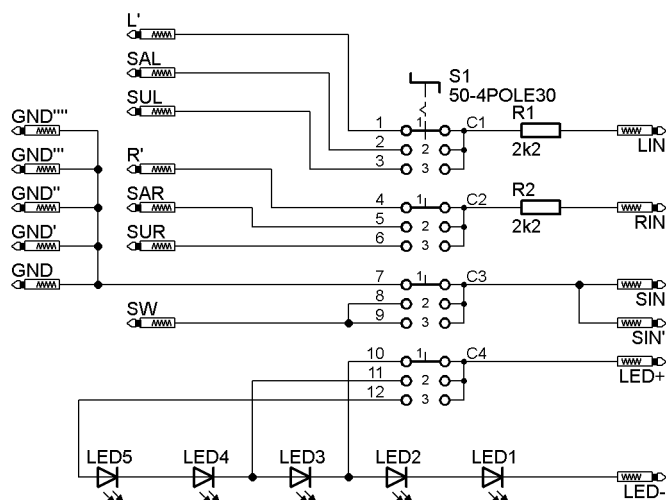
$$t = RC_2 \ln \left(\frac{U_{\max}}{U_{\max} - 2,5} \right), \quad (6.1)$$

kde R je paralelní kombinace odporů R_1 a R_2 a U_{\max} je maximální napětí na kondenzátoru C_2 :

$$U_{\max} = \frac{15}{R_1 + R_2} R_2, \quad (6.2)$$

Dle předchozích vztahů a za použití součástek uvedených na obr. 6.1 je čas sepnutí 2s.

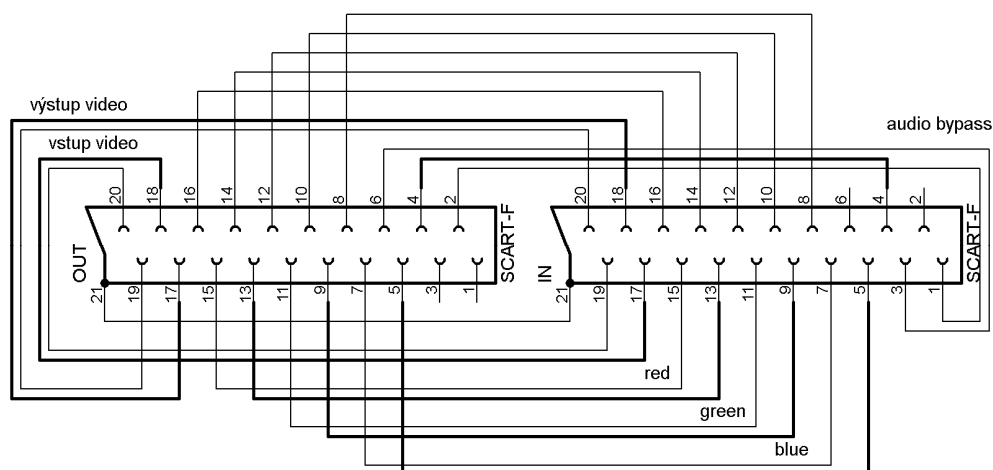
6.2 Přepínač režimů a jejich indikace



Obr. 6.2: Zapojení přepínače režimů a indikačních LED diod.

Přepínač režimů je 4-násobný 3-polohový otočný přepínač. První tři kontakty slouží k přepínání zvukových signálů do výkonových zesilovačů. Poslední kontakt slouží k sériovému zapojení 2, 3 nebo 5 LED diod indikujících zvolený režim 2.0, 2.1 nebo 4.1. (Počet rozsvícených LED diod odpovídá počtu zvukových kanálů v daném režimu.) Rezistory R_1 a R_2 společně s potenciometrem BALANCE (uvedený v příloze A.1) slouží k vyvážení levého a pravého kanálu ve všech režimech. Zároveň tento obvod vyvážení sníží úroveň signál ze vstupní jednotky o hodnotě $U = 707$ mV na hodnotu $U = 630$ mV, což je požadovaná úroveň vstupní citlivosti zesilovače.

6.3 Detail zapojení konektorů scart



Obr. 6.3: Detailní zapojení konektoru scart.

Pomocí konektorů scart je možné zařízení zapojit mezi standardní domácí audio-video spotřebiče (například mezi TV a set top box). Zařízení využívá vstupní audio piny konektoru SCART_IN (set top box) a výstupní audio piny konektoru SCART_OUT (TV, HiFi ...). Pro zachování funkce všech ostatních nevyužitých pinů je třeba provést bypass těchto pinů. Video signály a další řídicí signály obsaženy v konektoru scart tak prochází beze změny v obou směrech (včetně opačného směru audio signálu). Toto zapojení je zobrazeno na obr. 6.3.

6.4 Možnosti připojení zařízení

Připojení zařízení je možné dle potřeby pomocí konektorů scart, pokud je vyžadováno propojení s AV systémem např. s TV, nebo pomocí konektorů cinch, pokud jde o propojení s audio systémem. Tyto konektory jsou propojeny paralelně, zařízení je teda připojitelné pouze jedním typem konektoru pro vstup. Výstup je možné odebírat z obou typů konektoru současně. Jako druhý vstup, slouží konektor jack, po jehož zapojení dojde k odpojení vstupních konektorů scart a cinch.

7 ZÁVĚR

Byl navržen tří kanálový digitální zesilovač s výstupním výkonem levého a pravého kanálu $P_O = 10W / 4\Omega$ a s výkonem kanálu pro subwoofer $P_O = 20W / 8\Omega$. Digitální zesilovač levého a pravého kanálu byl doplněn o návrh opožděného připojení reproduktorů. Dále byl navržen limiter pro levý a pravý kanál a také pro efektní kanál. Kanál pro pasivní subwoofer není doplněn o limiter a proto vlivem neopatrnosti při zacházení se zařízením může dojít k přebuzení zesilovače pro pasivní subwoofer. Byly navrženy a odsimulovány filtry pro efektní kanály a byl proveden návrh digitální zpožďovací linky.

Zařízení využívá pro vytvoření prostorového vjemu princip technologie dolby surround, což je starší, dnes již zřídka využívaná technologie, ale s výhodou se dá realizovat pomocí analogových obvodů. Pro modernější technologii prostorového zvuku by bylo třeba doplnit zařízení o A/D a D/A převodníky a o signálový procesor, čímž by se výrazně zvýšila složitost zapojení a jeho návrhu.

Experimentálním měřením v laboratoři byly změřeny parametry funkčního prototypu. Odstup signálu ku šumu vstupní jednotky je horší, než očekávaná hodnota. Důvodem může být vlastní šum použitého fotorezistoru. Výstupní výkon stereo zesilovače je menší než výkon předpokládaný z důvodu nastavení nižšího výstupního napětí limiteru ve vstupní jednotce. V tab. 7.1 jsou shrnuty nejdůležitější parametry celého zařízení získané měřením v laboratoři.

Tab. 7.1: Nejdůležitější parametry funkčního prototypu.

VSTUPNÍ JEDNOTKA	
Rozsah zpracování napětí vstupního signálu	200mV - 2V
Harmonické zkreslení (THD+N)	<0,08%
Odstup signálu ku šumu (S/N)	80dB
EFEKTOVÁ JEDNOTKA	
Odstup signálu ku šumu výhybky pro subwoofer (S/N)	95dB
Odstup signálu ku šumu výhybky pro satelity (S/N)	95dB
Odstup signálu ku šumu efektního kanálu (S/N)	89dB
Harmonické zkreslení a šum efektního kanálu (THD+N)	(0,15 - 0,25)%
VÝKONOVÉ ZESILOVAČE	
Harmonické zkreslení můstkového zesilovače (THD)	
P = 1W	0,15%
P = 20W	0,4%
Harmonické zkreslení a šum stereo zesilovače (THD+N)	
P = 1W	0,70%
P = 6W	1,90%
Odstup signálu ku šumu můstkového zesilovače (S/N)	99dB
Odstup signálu ku šumu stereo zesilovače (S/N)	90dB

LITERATURA

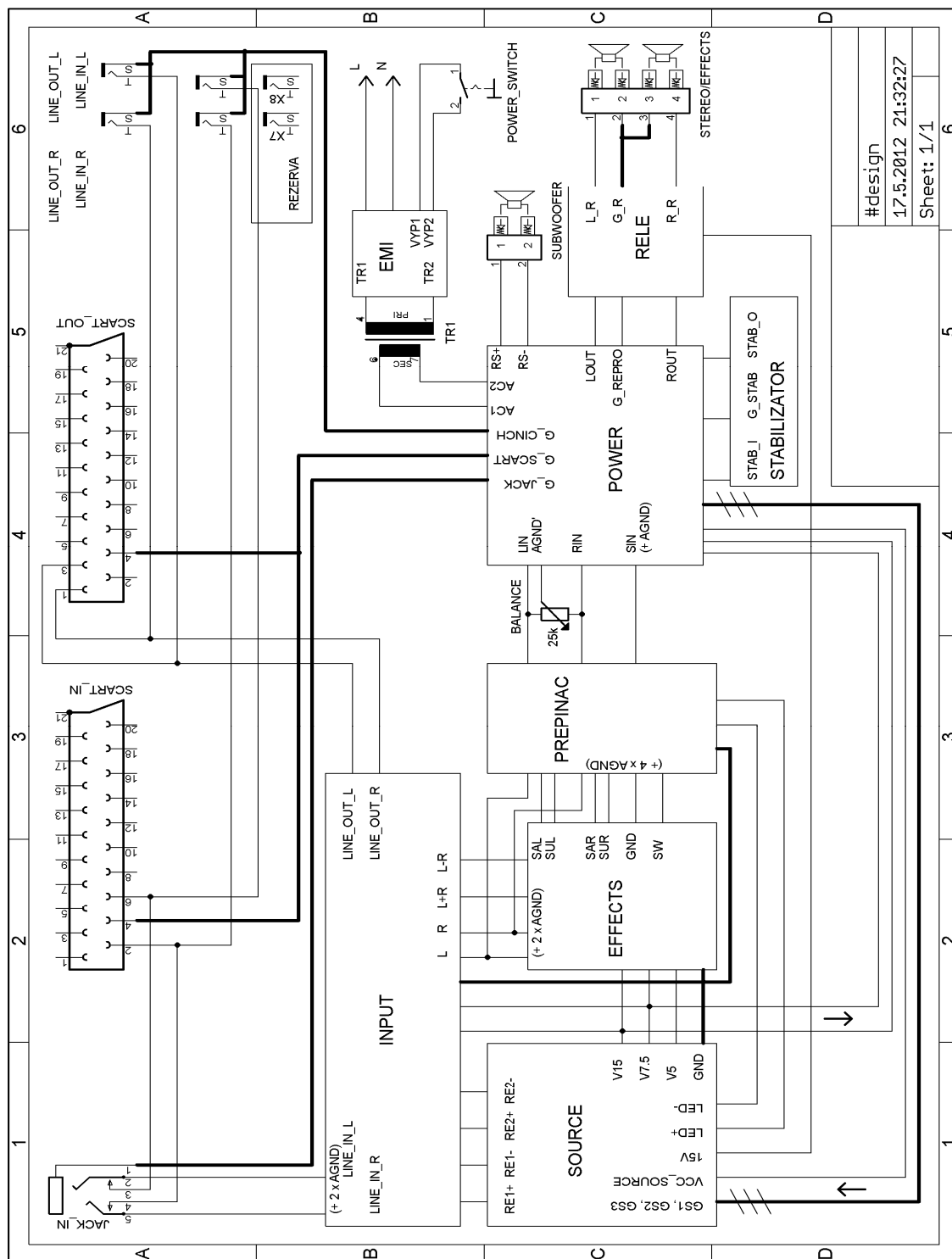
- [1] Texas Instruments [online]. Datasheet TPA3122D – 15-W Stereo Class-D Audio Power Amplifier (Rev. A). Texas Instruments, INC., 2007 – [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné na www: <http://www.ti.com/product/tpa3122d2>
- [2] Texas Instruments [online]. Datasheet OPA1641/1642/1644 SoundPLUS™ High-Performance, JFET-Input Audio OpAmps (Rev. B). Texas Instruments, INC., 2010 – [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné na www: <http://www.ti.com/product/opa1641>
- [3] Dolby Laboratories [online]. Technical Papers Dolby Surround Mixing Manual. Dolby Laboratories, INC. – [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné na www: <http://www.dolby.com/us/en/professional/technology/home-theater/dolby-pro-logic-ii.html>
- [4] ELLIOTT, R. Simple Surround Sound Decoder [online]. Elliott Sound Products, 1999 – [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné na www: <http://sound.westhost.com/project18.htm>
- [5] Princeton [online]. Data Sheet PT2399 – Echo Processor (Ver. 1.2). Princeton Technology Corp., 2000 – [cit. 14. 12. 2011]. Dostupné na www: <http://www.princeton.com.tw/>
- [6] AVAX. Presentation Tantalum vs Ceramic capacitor. Avax, a.s., 2002 – [cit. 14. 12. 2011].

SEZNAM PŘÍLOH

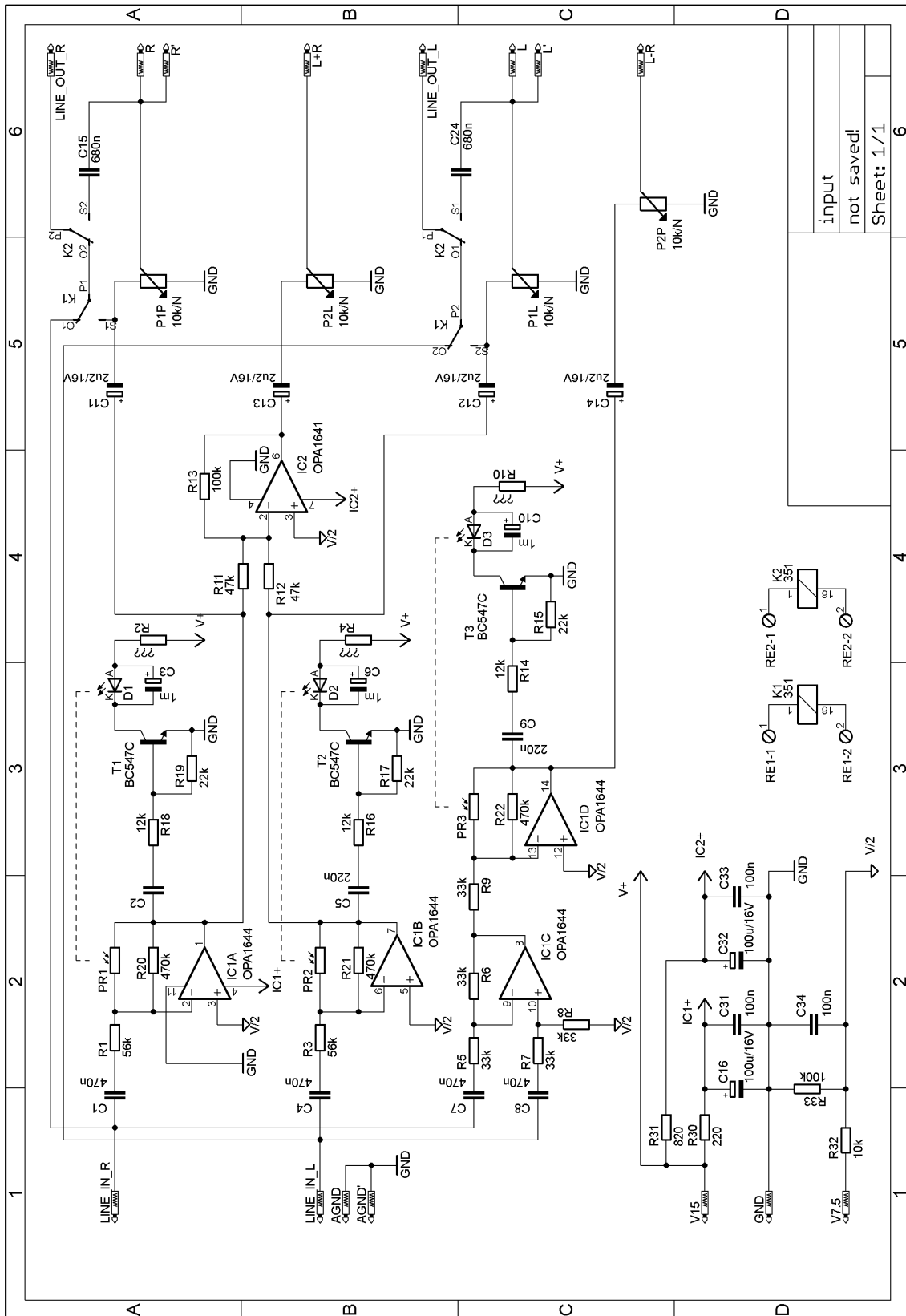
A	Návrh zařízení	25
A.1	Celkové blokové schéma	25
A.2	Výkonová jednotka – power	26
A.3	Vstupní jednotka – input	27
A.4	Efektová jednotka – effects.....	28
B	Konstrukční podklady	29
B.1	Výkonová jednotka – power	29
B.2	Vstupní jednotka – input.....	30
B.3	Efektová jednotka – effects.....	32
B.4	Napájecí jednotka – source	33
B.5	Vstupní EMI filtr	34
B.6	Stabilizátor	34
B.7	Zpožděné připojení reproduktorů	35
C	Protokol z měření	36
D	Fotodokumentace	38

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

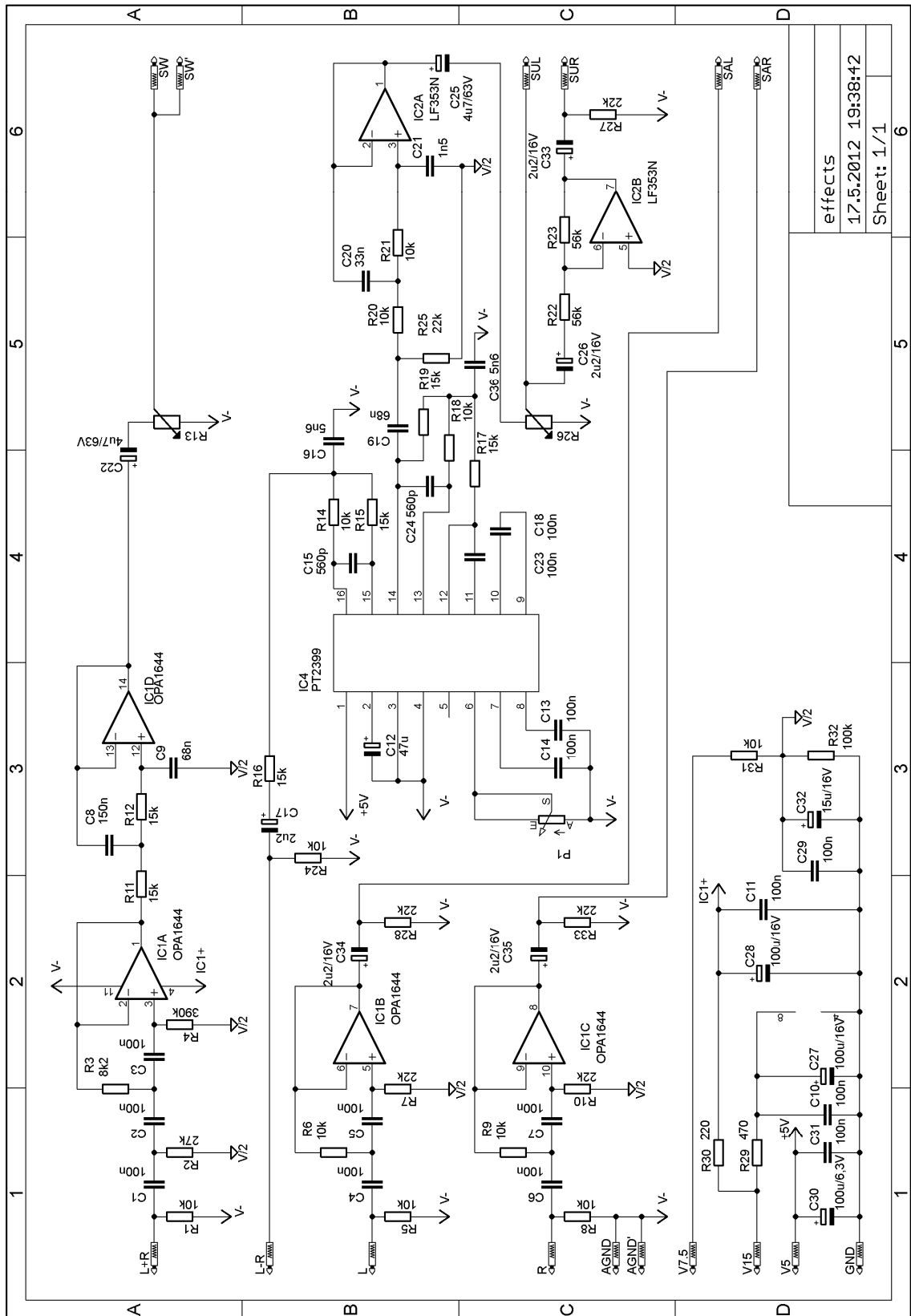
A.1 Celkové blokové schéma



A.3 Vstupní jednotka – input

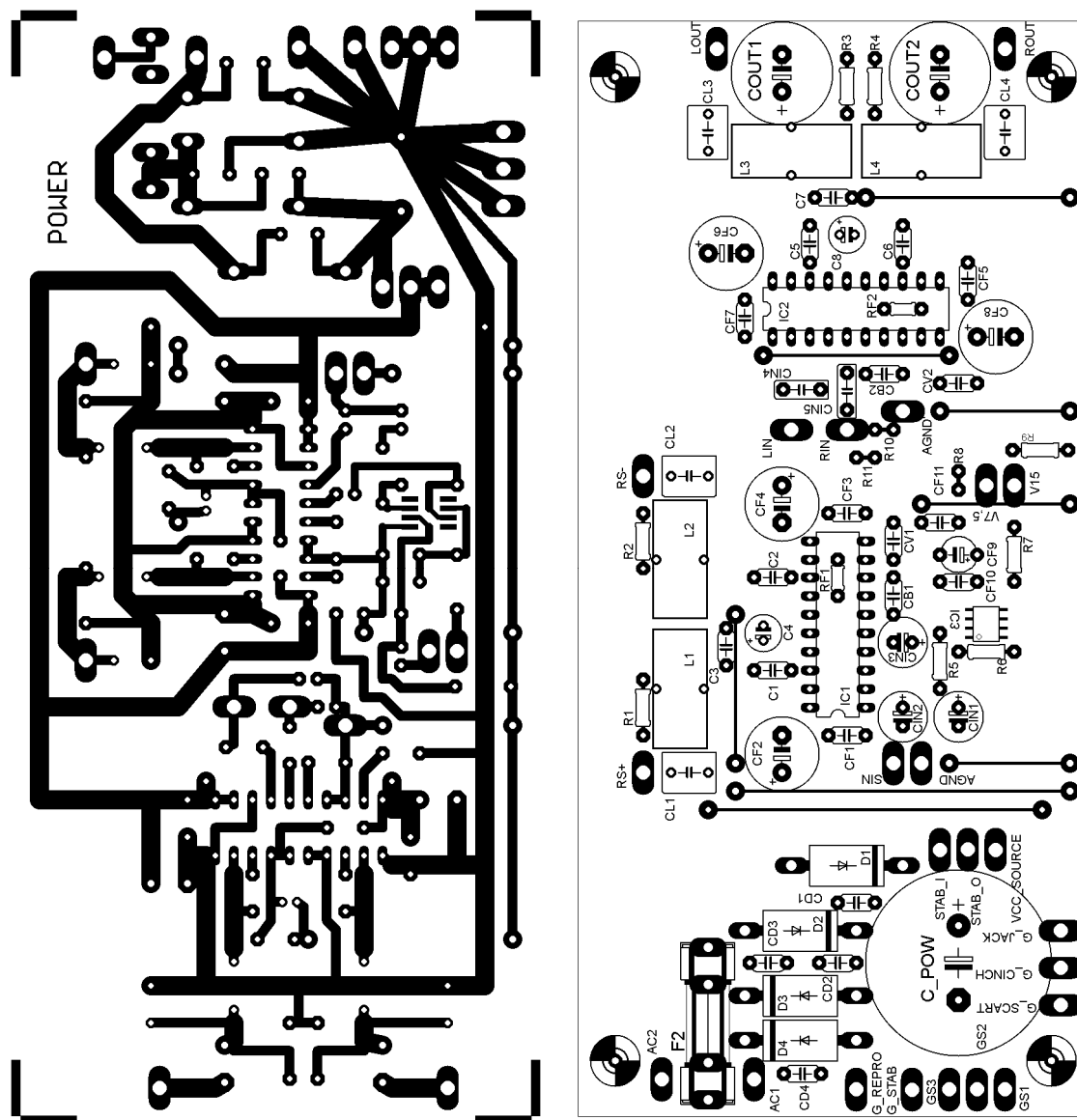


A.4 Efektivá jednotka – effects



B KONSTRUKČNÍ PODKLADY

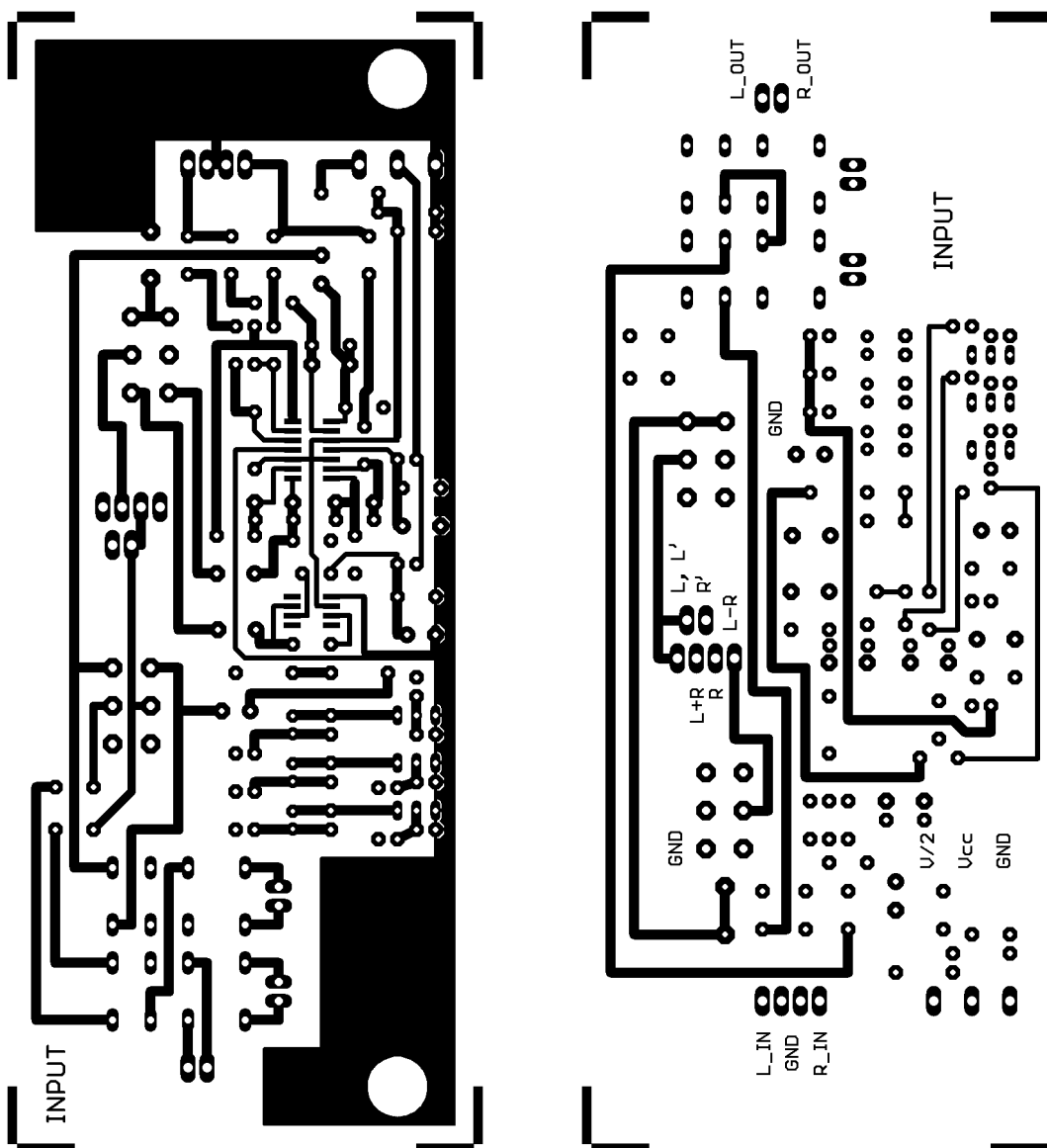
B.1 Výkonová jednotka – power



DPS – strana spojů, rozměry desky 150 x 70 [mm], měřítko M 1:1 (vlevo)

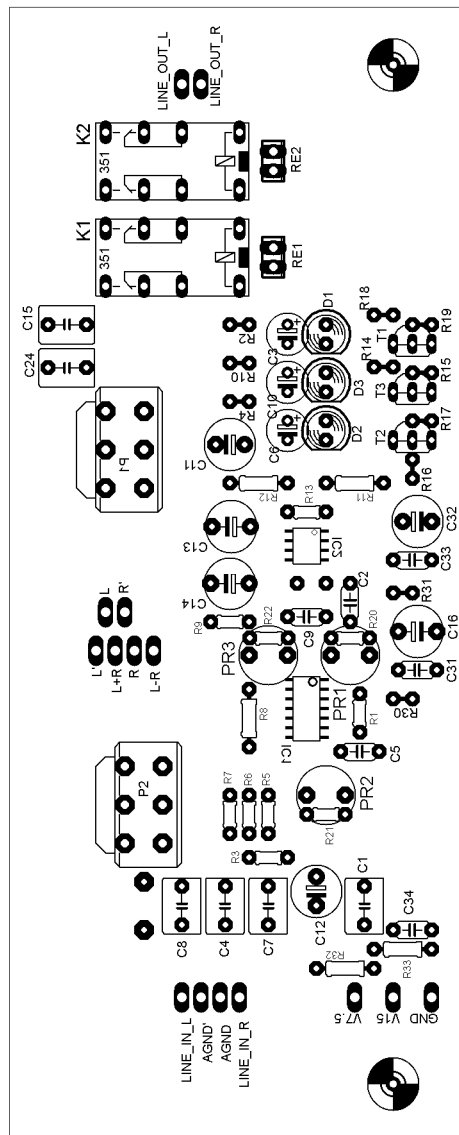
DPS – osazovací plán (vpravo)

B.2 Vstupní jednotka – input



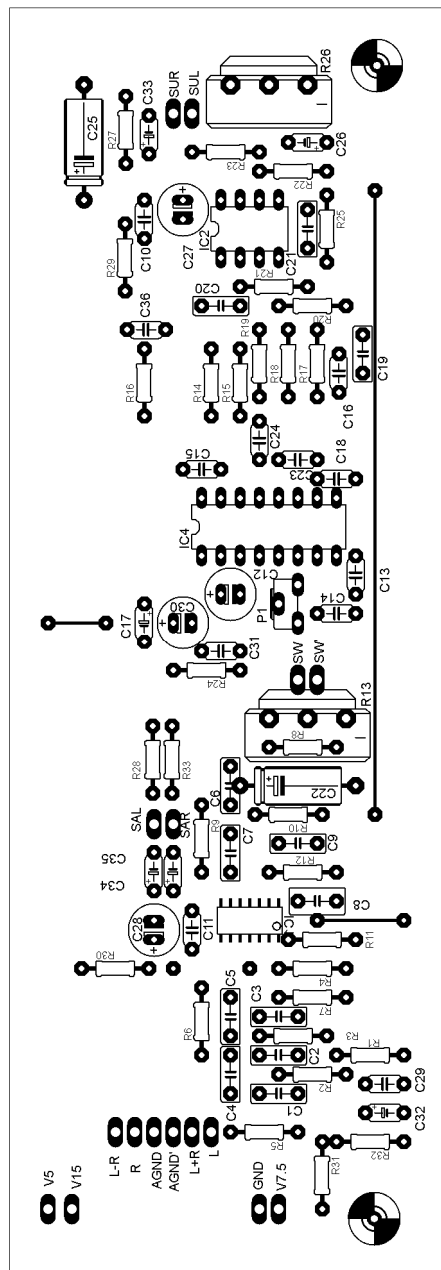
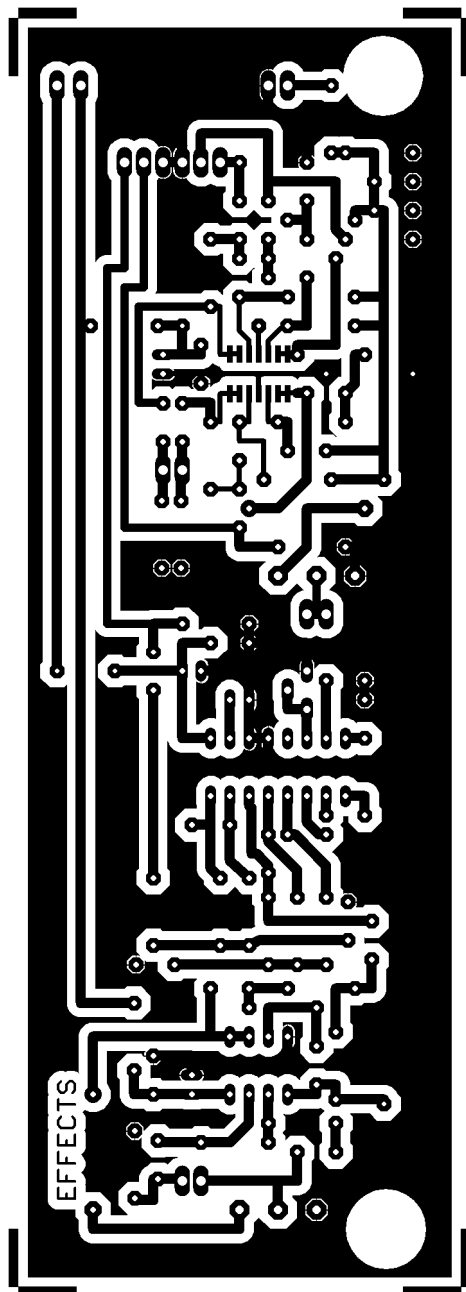
DPS – strana spojů, rozměry desky 150 x 61 [mm], měřítko M1:1 (vlevo)

DPS – strana součástek, rozměry desky 150 x 61 [mm], měřítko M1:1 (vlevo)



DPS – osazovací plán

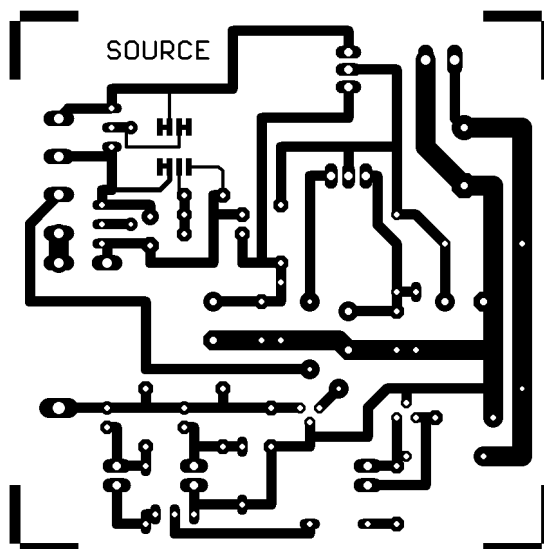
B.3 Efektová jednotka – effects



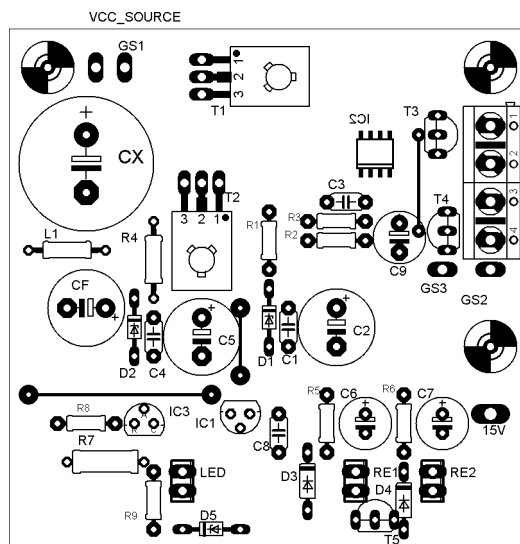
DPS – strana spojů, rozměry desky 168 x 58 [mm], měřítko M 1:1 (vlevo)

DPS – osazovací plán (vpravo)

B.4 Napájecí jednotka – source

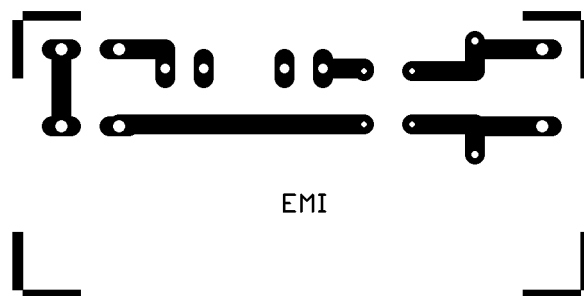


DPS – strana spojů, rozměry desky 67 x 67[mm], měřítko M 1:1

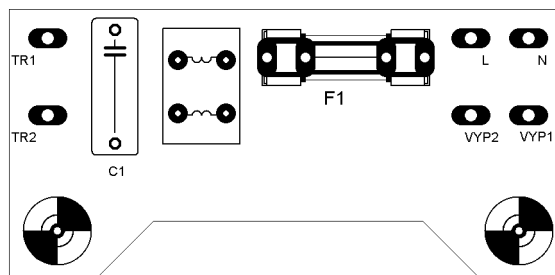


DPS – osazovací plán

B.5 Vstupní EMI filtr

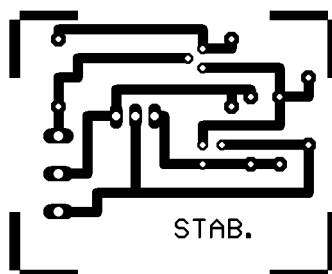


DPS – strana spojů, rozměry desky 74 x 36 [mm], měřítko M 1:1

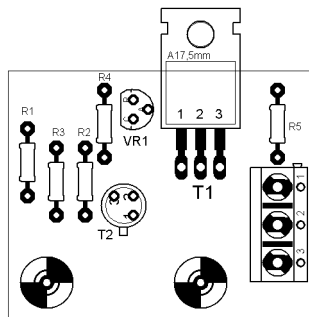


DPS – osazovací plán

B.6 Stabilizátor

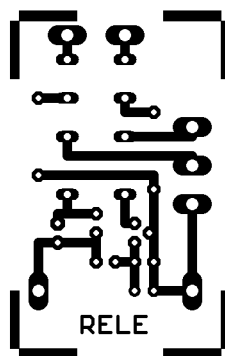


DPS – strana spojů, rozměry desky 41 x 33 [mm], měřítko M 1:1

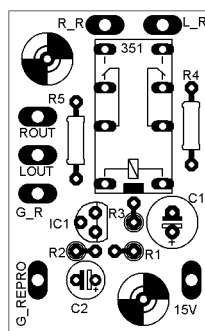


DPS – osazovací plán

B.7 Zpožděné připojení reproduktorů



DPS – strana spojů, rozměry desky 27 x 43 [mm], měřítko M 1:1



DPS – osazovací plán

C PROTOKOL Z MĚŘENÍ

Harmonické zkreslení a šum stereo zesilovače ($f = 1 \text{ kHz}$)

Levý kanál		Pravý kanál	
P [W]	THD+N [%]	P [W]	THD+N [%]
0,0025	0,37	0,0025	0,36
0,01	0,097	0,01	0,11
0,04	0,13	0,04	0,13
0,16	0,27	0,16	0,28
0,64	0,59	0,64	0,63
1	0,76	1	0,82
2,25	1,2	2,25	1,38
4	1,7	4	1,87
6,02	1,96	6,2	2

Harmonické zkreslení můstkového zesilovače ($f = 100 \text{ Hz}$)

P [W]	1	3	5	7	10	15	20
THD na $2*f$ [%]	0,065	0,09	0,137	0,15	0,183	0,235	0,279
THD na $3*f$ [%]	0,065	0,13	0,165	0,2	0,218	0,24	0,278
THD [%]	0,092	0,158	0,214	0,25	0,285	0,336	0,394

Vstupně-výstupní charakteristika limiteru

U_{in} [mV]	U_{out} [mV] – levý kanál			U_{out} [mV] – pravý kanál		
	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 Hz	1 kHz	10 kHz
10	99	99	98	99	100	99
20	197	198	197	199	200	198
40	396	397	394	398	400	396
60	592	595	590	597	564	594
80	640	606	605	615	583	581
100	648	614	613	622	591	588
150	660	625	624	635	600	598
200	666	632	631	640	607	604
400	684	647	646	656	621	618
800	700	663	662	670	634	632
1000	707	669	668	677	639	637
2000	727	689	688	692	655	653
4000	755	716	715	714	675	674
6000	778	737	736	729	690	688

Harmonické zkreslení a šum vstupní jednotky ($f = 1$ kHz)

U_{in} [mV]	THD+N [%] – levý kanál	THD+N [%] – pravý kanál
50	0,056	0,054
100	0,12	0,113
200	0,077	0,08
400	0,058	0,063
800	0,042	0,045
1600	0,031	0,04

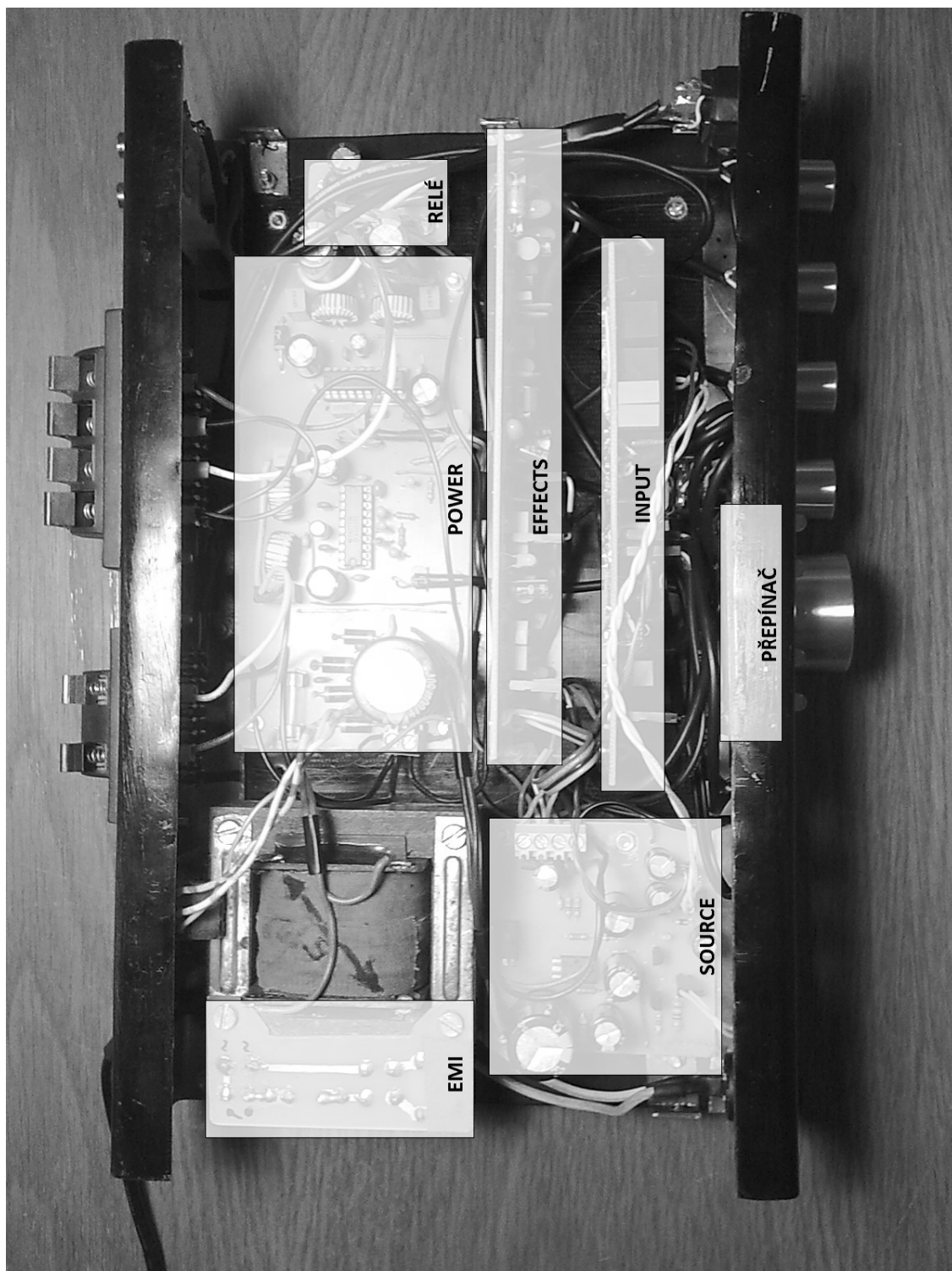
Modulová frekvenční charakteristika efektového kanálu ($U_{in} = 707$ mV)

f [kHz]	U_{out} [mV]	G [dB]
0,02	178	-14,0
0,03	235	-11,6
0,04	300	-9,5
0,05	333	-8,6
0,06	365	-7,8
0,07	413	-6,7
0,08	452	-5,9
0,09	474	-5,5
0,1	492	-5,2
0,2	630	-3,0
0,3	682	-2,3
0,5	740	-1,6
0,7	791	-1,1
1	893	0,0
2	900	0,1
3	393	-7,1
4	133	-16,5
5	62,6	-23,1
6	36,3	-27,8
7	21,8	-32,2
8	16	-34,9
10	7,9	-41,1

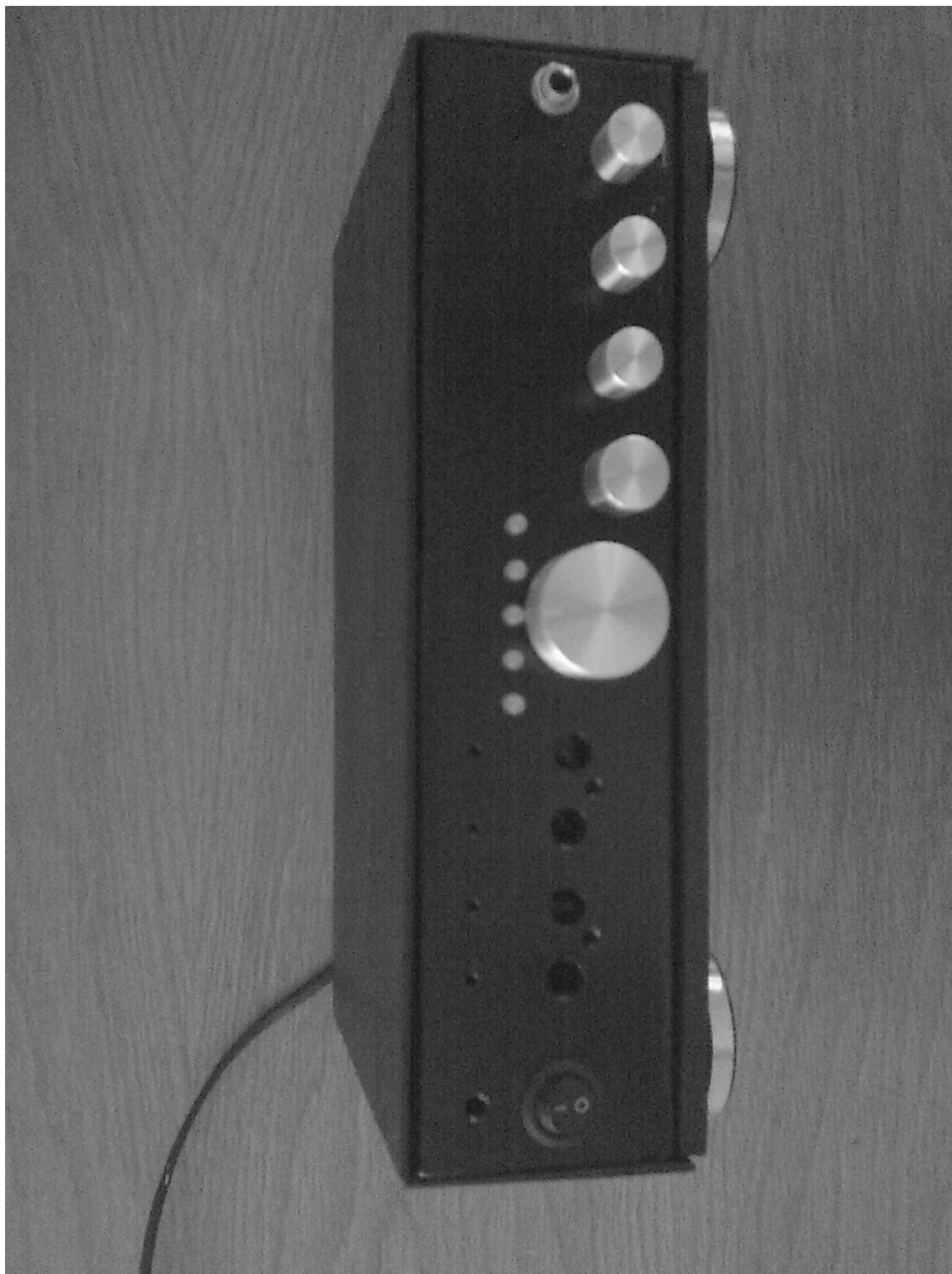
Závislost harmonického zkreslení a šumu efektového kanálu na velikosti zpoždění signálu potenciometrem P_1 ($f = 1$ kHz)

R [k Ω]	0	0,8	1,6	2,5	3,3	4,1	5
THD+N [%]	0,158	0,156	0,155	0,199	0,21	0,23	0,24

D FOTODOKUMENTACE



Vnitřní uspořádání vyhotoveného prototypu se zvýrazněním a popisem jednotlivých bloků.



Čelní pohled vyhotoveného prototypu.